

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Kristijan Čuljak

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Hrvoje Juretić, dipl. ing.

Student:

Kristijan Čuljak

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Hrvoju Juretiću na velikodušno pruženoj pomoći i vremenu tijekom izrade ovog rada kao i Goranu Smoljaniću, mag.ing. Također zahvaljujem majci i baki koje su mi omogućile da uopće dođem do ove faze životnog obrazovanja.

Kristijan Čuljak



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Kristijan Čuljak** Mat. br.: 0035199991

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Projekt sustava za membransku filtraciju bunarske vode**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Design of groundwater membrane filtration system**

Opis zadatka:

Potrebno je predložiti idejno rješenje i dimenzionirati postrojenje za membransku filtraciju bunarske vode kapaciteta 10 m³/h. Obradena voda mora zadovoljavati kriterije kvalitete u skladu s važećim standardom za vodu za ljudsku potrošnju. Na raspolaganju je bunarska voda sljedećeg sastava:

Pokazatelj	Vrijednost	Jedinice
Temperatura	12,4	°C
pH vrijednost	7,20	-
Ukupne suspenzije (TSS)	3	mg/L
Električna provodnost	671	μS/cm
Mutnoća	0,23	NTU
Otopljeni organski ugljik (DOC)	0,9	mg/L
Utrošak KMnO ₄	1,84	mg/L O ₂
Ukupna tvrdoća	319	mg/L CaCO ₃
Alkalitet	3	mmol/L
Ukupni koliformi	9	br/100 mL
<i>Escherichia coli</i>	0	br/100 mL

Rad treba sadržavati:

1. Izbor tehnološkog postupka za obradu bunarske vode;
2. Osnovni proračun postrojenja;
3. Tehnološku shemu postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad;
4. Prikaz utroška energije i kemikalija;
5. Prikaz smještaja postrojenja.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenoga 2018.

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:


izv. prof. dr. sc. Hrvoje Juretić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
1.1. O vodi.....	1
1.2. Problematika zadatka	4
2. MEMBRANSKA FILTRACIJA	7
2.1. Općenito	7
2.2. Membranska transportna teorija.....	9
3. ULTRAFILTRACIJA	13
3.1. Kontekst	13
3.2. Taloženje na membranama	14
3.3. Strukture membrana i načini rada	19
3.3.1. Materijali.....	19
3.3.2. Geometrija.....	19
3.3.3. Načini rada	20
4. PRORAČUN POSTROJENJA.....	23
4.1. Parametri bunarske vode	23
4.2. Osnovni proračun	25
4.3. Prikaz utroška kemikalija.....	29
4.4. Proračun spremnika.....	31
4.5. Prikaz utroška energije.....	32
5. ZAKLJUČAK.....	37
LITERATURA.....	38
PRILOZI.....	40

POPIS SLIKA

Slika 1: Geometrijski prikaz molekule vode	1
Slika 2: Krivulja napetosti vode [3]	2
Slika 3: a) Principijelna shema filtracije pomoću membrane; b) Prikaz veličina nekih specifičnih tvari te mogućnosti njihove obrade [9]	7
Slika 4: Prikaz postupaka u ovisnosti o veličini pora i modela transportne teorije [9].....	10
Slika 5: a) Poprečni presjeci membrana različitih zavojitosti; b) Površina membrana iste poroznosti, ali različitih promjera pora; c) Površinska filtracija; d) Dubinska filtracija [9].....	12
Slika 6: Prikaz taloženja na površini membrane te unutarnjeg taloženja [9]	14
Slika 7: Sheme i dijagrami rada sustava principom konstantan fluks a) i konstantan tlak b) [9]	15
Slika 8: Načini čišćenja membrana protupranjem; a) standardni način , b) normalni tok uz protupranje na donjem dijelu membrane te c) suprotni tok uz protupranje na gornjem dijelu [9].....	18
Slika 9: Prikaz strujanja unutar modula: a) princip izvana-unutra, b) jednoizlazni princip iznutra-van, c) ukriženi princip iznutra-van; prikaz strujanja u odnosu na mebranu: d) jednoizlazno, e) ukriženo [10]	22
Slika 10: Početno sučelje <i>inge® System Designa</i>	25
Slika 11: Prikaz odabranog modula [14].....	26
Slika 12: Shematski prikaz ciklusa filtriranja u ovisnosti o vremenu	27
Slika 13: Shematski prikaz jednoizlazne filtracije	28
Slika 14: Shematski prikaz ciklusa CEB-a u ovisnosti o vremenu	29
Slika 15: Principijelna shema značajnih padova tlaka u sustavu	32
Slika 16: Prikaz potpone crpke <i>SP 11-7</i> [17]	33
Slika 17: Prikaz centrifugalne pumpe <i>CRIE 20-1 A-CA-A-E-HQQE</i> [18].....	34

POPIS TABLICA

Tablica 1: Fizikalna svojstva vode [1, 3]	3
Tablica 2: Indikatorski parametri kao pokazatelji zdravstvene ispravnosti vode [7].....	5
Tablica 3: Parametri bunarske vode kao ulazni podaci u proračun.....	23
Tablica 4: Prikaz rezultata ciklusa filtracije dobivenih pomoću <i>inge® System Design</i>	26
Tablica 5: Prikaz rezultata kemijski pojačanog čišćenja dobivenih pomoću <i>inge® System Design</i>	29
Tablica 6: Padovi tlaka u filtracijskom načinu rada dobiveni pomoću <i>inge® System Designa</i>	32
Tablica 7: Kataloški podaci potopne crpke <i>SP 11-7</i> [17].....	33
Tablica 8: Padovi tlaka u načinu rada protupranja i CEB-a dobiveni pomoću <i>inge® System Designa</i>	34
Tablica 9: Kataloški podaci centrifugalne pumpe <i>CRIE 20-1 A-CA-A-E-HQQE</i> [18]	35
Tablica 10: Prikaz utroška kemikalija i energije	36

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
ZRKČ – 1	Tehnološka shema
ZRKČ – 2	Smještaj postrojenja

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
J_i	$\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	brzina prijenosa komponente i otopine ili fluks
$\frac{dc_i}{dx}$	g cm^{-4}	koncentracijski gradijent komponente i
D_i	$\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$	difuzijski koeficijent
$\frac{dp}{dx}$	Pa cm^{-1}	gradijent tlaka u poroznom mediju
c_i	g cm^{-3}	koncentracija komponente i
K'	$\text{cm}^2 \text{ Pa}^{-1} \text{ s}^{-1}$	koeficijent koji se odnosi na vrstu medija
A_m	m^2	aktivna membranska površina jednog modula
n_m	-	ukupni broj modula
n_{mj}	-	broj membranskih jedinica
A_u	m^2	ukupna filtracijska površina
Q_u	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	prosječni protok napojne vode
Q_n	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	projektni kapacitet
Q_i	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	prosječni protok filtrirane vode
t_f	min	filtracijsko vrijeme
Q_{bw}	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	protok protupranja
t_{bw}	s	vrijeme protupranja
t_{pbw}	s	vrijeme pauze prije protupranja
t_{ka}	s	kašnjenje armature
Q_w	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	prosječni protok otpadne vode od protupranja
$T_{filtracija}$	min	vrijeme ciklusa filtracije
Y	-	faktor konverzije
V_u	m^3	volumen napojne vode u jednom ciklusu
V_p	m^3	volumen permeata u jednom ciklusu
V_{pr}	m^3	volumen vode potrebne za protupranje u jednom ciklusu
γ	-	masena koncentracija
ρ	g cm^{-3}	Gustoća
Q_{doz}	L h^{-1}	protok doziranja kemikalije u CEB postupku
f_{CEB}	h	vrijeme između dva CEB-a
t_{doz}	s	vrijeme doziranja kemikalija
F_{doz}	$\text{L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	fluks kemikalija
t_{nam}	min	vrijeme namakanja
F_{isp}	$\text{L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$	fluks ispiranja
t_{isp}	s	vrijeme ispiranja
Q_{CEB}	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	protok vode u CEB-u

N_d	-	broj ciklusa filtracija u jednom danu
V_{NaOH}	L	volumenska količina NaOH u jednom ciklusu
m_{NaOH}	kg	masena količina NaOH u jednom ciklusu
V_{HCl}	L	volumenska količina HCl u jednom ciklusu
m_{HCl}	kg	masena količina HCl u jednom ciklusu
$N_{ciklus,mj}$	-	broj ciklusa CEB-a u mjesec dana
$\{V_{NaOH}\}_{mj}$	L	volumenska količina NaOH u jednom mjesecu
$\{m_{NaOH}\}_{mj}$	kg	masena količina NaOH u jednom mjesecu
$\{V_{HCl}\}_{mj}$	L	volumenska količina HCl u jednom mjesecu
$\{m_{HCl}\}_{mj}$	kg	masena količina HCl u jednom mjesecu
$V_{spremnik1}$	m ³	proračunski volumen spremnika za filtrat
$V_{spremnik2}$	m ³	proračunski volumen spremnika za otpadne vode
h_p	m	visina dobave potopne pumpe
P_1	W	potrebna električna snaga potopne pumpe
$(h_p)_{BW}$	m	visina dobave centrifugalne pumpe za mehaničko protupranje
$(h_p)_{CEB}$	m	visina dobave centrifugalne pumpe za CEB
P_{21}	W	potrebna električna snaga centrifugalne pumpe za mehaničko protupranje
P_{22}	W	potrebna električna snaga centrifugalne pumpe za CEB
t_1	h	vrijeme rada potopne pumpe za dobavu napojne vode
W_1	kWh	potrebna električna energija potopne pumpe
T_{21}	h	vrijeme rada centrifugalne pumpe za mehaničko protupranje
W_{21}	kWh	potrebna električna energija centrifugalne pumpe za mehaničko protupranje
W_{22}	kWh	potrebna električna energija centrifugalne pumpe za CEB
$W_{el,uk}$	kWh	ukupna potrebna električna energija za sve pumpe
$V_{filtrat}$	m ³	ukupni volumen filtrirane vode u mjesec dana
w_{el}	kWh m ⁻³	ukupna specifična električna energija

SAŽETAK

U završnom radu prikazano je idejno rješenje sustava membranske filtracije bunarske vode kapaciteta $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Bunarska voda koja je na raspolaganju zadovoljava većinu parametara, a njezinom dodatnom obradom postiže se produkt koji je u skladu s važećim Pravilnikom o kvaliteti vode za ljudsku potrošnju. Kao membranski proces odabrana je ultrafiltracija. Osnovni proračun potpomognut je računalnim paketom *inge® System Design*, a uz njega dan je prikaz utroška kemikalija i energije.

U prilogu su dani sljedeći crteži:

- tehnološka shema postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad,
- prikaz smještaja postrojenja.

Ključne riječi: bunarska voda, membranska filtracija, ultrafiltracija, postrojenje za obradu voda

SUMMARY

In this final thesis, the conceptual design of groundwater membrane filtration system with a capacity of $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ was presented. The groundwater that is available meets most of the water quality requirements intended for human consumption. In order to improve its quality and to make it safe and suitable for its intended use, the treatment by ultrafiltration was proposed. Basic calculation was aided by *inge® System Design* software. Furthermore, the calculations of chemicals and energy consumption are also given.

The following drawings are enclosed:

- Process flow diagram,
- Disposition of equipment.

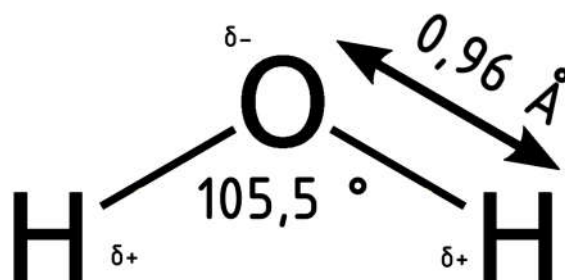
Key words: groundwater, membrane filtration, ultrafiltration, water treatment plant

1. UVOD

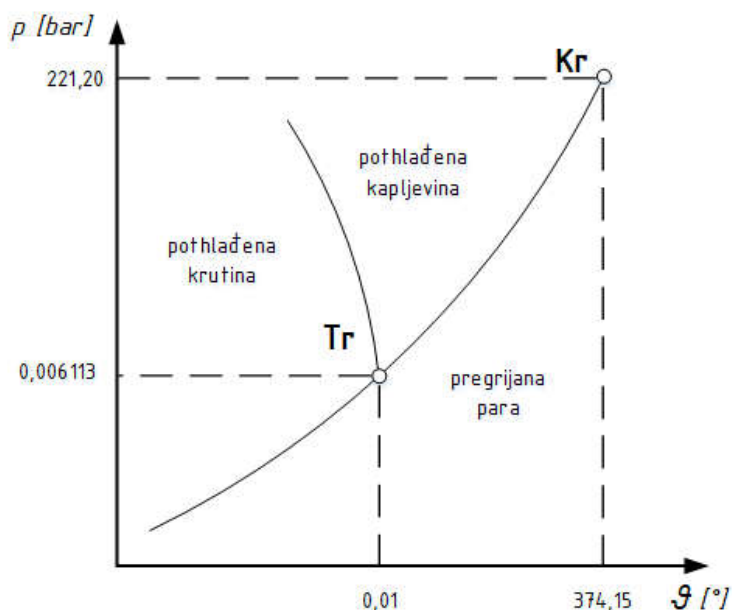
1.1. O vodi

Voda je kao treća najjednostavnija molekula u prirodi poslije vodika i ugljikova monoksida, jedna od najvažnijih tvari. Njena važnost očituje se u tome što ima osnovno značenje za život na Zemlji, sudjeluje u osnovnom biološkom procesu proizvodnje – fotosintezi te je u razvoju Zemlje bila bitan faktor za postanak i razvoj organizama. Sastavni je dio živih organizama te se u njima nalazi u postocima od 50 do 90% [1]. Najrasprostranjenija je na Zemlji te čini otprilike 70% njene površine. Prema procjenama ukupni volumen vode na Zemlji iznosi 1385 milijuna kubičnih kilometara od toga na slatku vodu spada samo 2,6% odnosno oko 36 milijuna km³, a ostatak su oceani i mora [2]. Kopnene površinske slatke vode na Zemlji ima oko 350 000 km³. Slikovito rečeno, kada bi se sva voda na Zemlji predočila ispunjenom posudom od 10 litara, slatkovodni dio bi stao u čašu volumena 0,25 L, a nama bi dostupna bila tek koja kap.

Molekula vode sastoji se od vodika i kisika pri čemu je kisik otprilike 16 puta teži. Svojom veličinom od 0,96 angstrema ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$) spada u tri najmanje molekule, a od nje su manje molekule vodika i fluorovodika. Polarne molekule privlače se svojim različitim krajevima; u molekuli vode to je djelomično negativno nabijeni atom kisika, a na krajevima molekule djelomično pozitivni naboj vodikovih atoma. Tako nabijeni atomi formiraju asimetričnu strukturu što uzrokuje dipolni karakter molekule. Polarnost molekule vode prikazana je kvalitativno na Slici 1.



Slika 1: Geometrijski prikaz molekule vode



Slika 2: Krivulja napetosti vode [3]

Voda izravno nastaje reakcijom vodika s kisikom, a kao nusprodukt pojavljuje se u procesima izgaranja spojeva koji sadrže vodik, pirolize hidrata i metaboličkih reakcija u organizmima. Voda se može obogatiti deuterijem pa se takva voda naziva teškom vodom. Teška voda se koristi kao rashladno sredstvo te kao moderator za usporavanje neutrona u reaktorskoj tehnici. Udio teške vode u prirodnoj je oko 0,015% pri čemu je nešto veći udio u slanim vodama [1]. Struktura vode ovisi o njezinom agregatnom stanju, a pojavljuje se u sva tri u oblika – led, kapljevina i para. Pojavnost vode ovisi o tlaku i temperaturi što je kvalitativno prikazano na Slici 2. Svaku tvar osim njezine strukture definiraju i svojstva, pa tako i vodu. Svojstva vode su toliko dobra i raširena da je voda našla svoju primjenu u skoro svakoj ljudskoj djelatnosti. S vodom se susrećemo svaki dan te možemo osjetiti neka njezina svojstva. Zbog manje gustoće leda vode od kapljevine on pluta, a gustoća ne prati trend smanjenja povećanjem temperature već ona pri otprilike 4 °C poprima najveću vrijednost. To je svojstvo poznato kao anomalija vode, a gustoća je općenito vode velika te time izaziva nisku kompresibilnost. Voda ima neobično velik specifični toplinski kapacitet koji iznosi $4186,8 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ s obzirom na to da nijedna druga tekućina nema tako veliki kapacitet pri sličnim uvjetima. Upravo zbog toga se voda primjenjuje u procesnoj i energetske industriji, a i sama mora odnosno oceani kao velike vodene mase imaju ulogu velikih toplinskih kolektora. Voda, nadalje, ima visoko talište i vrelište, veliku toplinu isparivanja, veliku

površinsku napetost, veliki viskozitet, veliki dipolni moment te druga svojstva zbog kojih nalazi primjenu u svakodnevnicu [4]. Ta svojstva kvantificirana su u Tablici 1.

Tablica 1: Fizikalna svojstva vode [1, 3]

Svojstvo	Vrijednost	Mjerna jedinica
Ledište (1,013 bar)	0	°C
Vrelište (1,013 bar)	100	°C
Kritična temperatura	374,15	°C
Kritični tlak	220,5	bar
Kritična gustoća	314	kg m ⁻³
Temperatura trojne točke	0,01	°C
Tlak trojne točke	0,006113	bar
Gustoća (0 °C)	999,8	kg m ⁻³
Gustoća (3,98 °C)	1000	kg m ⁻³
Gustoća (20 °C)	997,01	kg m ⁻³
Dinamička viskoznost (20 °C)	0,00101	Pas
Površinska napetost (20 °C)	0,07275	N m ⁻¹
Površinska napetost (100 °C)	0,05250	N m ⁻¹
Toplina isparavanja (1,013 bar, 100 °C)	2256,9	kJ kg ⁻¹
Toplinski kapacitet (15 °C)	4186,8	J kg ⁻¹ K ⁻¹
Električna provodnost (čista voda, 20 °C)	$4,2 \times 10^{-6}$	S m ⁻¹
Konstanta dielektričnosti (25 °C)	78,25	-
Dipolni moment	$6,2 \times 10^{-30}$	C m ⁻¹
Brzina zvuka (20 °C)	1482,3	m s ⁻¹

Voda se koristi u vodovodnim sustavima kako bi se dopremila do ljudi na *kućni prag*. Također se koristi u poljoprivredi, uzgoju životinja, za komunalne potrebe, promet, pri iskorištavanju energije te u procesnim industrijama. Praktički voda je svugdje u industriji; od dobivanja energije preko pare i prijenosa topline, sirovina ili otpada preko obavljanja mehaničkog rada, prijenosa iona i pranja proizvoda do gašenja užarenih proizvoda, ispiranja plinova, održavanja tlaka i poboljšanja uvjeta zraka. Još u ranim civilizacijama ljudi su se znali brinuti za vodu. U starom Egiptu voda se tretirala na razne načine kako bi se postigla željena kvaliteta. Neki od njih su uključivali vrenje vode nad vatrom, grijanje pomoću Sunčeve energije ili korištenje kao nusprodukt taljenja željeza. Obrada voda spominje se i u Bibliji, a neke prve konkretne zapise o obradi voda datiraju iz 17. stoljeća kada je Sir Francis Bacon iznio svoje ideje o desalinizaciji vode u djelu „Povijest prirode u deset stoljeća“ [5]. Tijekom 17. i 18. stoljeća filtracija postaje udarna snaga u obradi voda, a prvo gradsko postrojenje za obradu voda napravili su Škoti početkom 19. stoljeća. To postrojenje služilo se gravitacijskim filtrima i pijeskom. U istom stoljeću u Londonu ljudi su počeli shvaćati da

uzročnike raznih bolesti kao što je kolera prenosi voda te su započeli s izradom legislative koja će regulirati njenu kvalitetu. Za gotovo sva ova polja ljudskih djelatnosti voda mora biti točno propisanog sastava; tako industrijske vode moraju biti bistre i bezbojne, bez željeza i mangana, poželjno je da su male tvrdoće te velike koncentracije slobodnih soli, dok su parametri kvalitete vode za ljudsku potrošnju znatno rigorozniji.

1.2. Problematika zadatka

U sklopu ovog završnog rada potrebno je predložiti rješenje za obradu bunarske vode pomoću membranskih filtracijskih postupaka, dati shemu postrojenja, prikazati smještaj opreme te procijeniti utrošenu energiju i kemikalije. Konačni proizvod obrade mora biti voda u skladu s važećim standardom za ljudsku potrošnju. U Republici Hrvatskoj voda za ljudsku potrošnju definirana je Zakonom o vodi za ljudsku potrošnju iz 2013. godine (NN 56/13, 64/15 i 104/17), a članak 4. točka 1. definira vodu namijenjenu za ljudsku potrošnju kao [6]:

a) sva voda koja je u svojem izvornom stanju ili nakon obrade namijenjena za piće, kuhanje, pripremu hrane ili druge potrebe kućanstava, neovisno o njezinom porijeklu te neovisno o tome potječe li iz sustava javne vodoopskrbe, iz cisterni ili iz boca odnosno posuda za vodu,

b) sva voda koja se rabi u industrijama za proizvodnju hrane u svrhu proizvodnje, obrade, očuvanja ili stavljanja na tržište proizvoda ili tvari namijenjenih za ljudsku potrošnju, osim ako nadležno tijelo ne utvrdi da kakvoća vode ne može utjecati na zdravstvenu ispravnost hrane u njezinom konačnom obliku.

Također, prema tom istom zakonu definirana je i zdravstveno ispravna voda za ljudsku potrošnju koja ne smije sadržavati mikroorganizme, parazite i njihove razvojne oblike, štetne tvari u koncentracijama koje same ili zajedno s drugim predstavljaju opasnost po zdravlje ljudi te ne smije prelaziti vrijednosti parametara zdravstveno ispravne vode. Ti se parametri provjeravaju na mjestu potrošnje vode, slavinama cisterni, mjestu punjenja boca ili druge ambalaže te u objektima za poslovanje s hranom. U već spomenutom pravilniku definirani su indikatorski parametri kao pokazatelji zdravstvene ispravnosti vode. Postoje razne tehnologije obrade vode, što za industrijsku što za ljudsku potrošnju, ali naglasak u radu je na filtraciji i to membranskoj koja se zasniva na procesu propuštanja vode kroz porozne membrane principom isključivanja po veličini te se koristi za uklanjanje mutnoće, virusa, bakterija i protozoa. Zbog mogućnosti uklanjanja finijih čestica u odnosu na mikrofiltraciju, široku raširenost metoda te lepezu mogućih rješenja, odabrana je metoda ultrafiltracije kao glavni postupak obrade vode.

Tablica 2: Indikatorski parametri kao pokazatelji zdravstvene ispravnosti vode [7]

Pokazatelj	Jedinice	M.D.K.	Napomena
Aluminij	µg/l	200	
Amonij	mg/l	0,50	
Barij*	µg/l	700	
Berilij*	µg/l		8
Boja	mg/PtCo skale	20	
Cink*	µg/l	3000	
Detergenti anionski	µg/l	200,0	
neionski*	µg/l	200,0	
Fenoli (ukupni)*	µg/l		6
Fosfati*	µgP/l	300	
Kalcij*	mg/l		8
Kalij*	mg/l	12	
Kloridi	mg/l	250,0	1
Kobalt*	µg/l		8
Koncentracija vodikovih iona	pH jedinica	6,5-9,5	1,2
Magnezij*	mg/l		8
Mangan	µg/l	50,0	
Ugljikovodici*	µg/l	50,0	9
Miris		bez	
Mutnoća	NTU	4	5
Natrij	mg/l	200,0	
Okus		bez	
Silikati*	mg/l	50	
Slobodni rezidualni klor*	mg/l	0,5	10
Srebro*	µg/l	10	7
Sulfati	mg/l	250,0	1
Temperatura*	°C	25	
Ukupni organski ugljik (TOC)	mg/l	Bez značajnih promjena	4
Ukupna tvrdoća*	CaCO ₃ mg/l		8
Ukupne suspenzije *	mg/l	10	
Utrošak KMnO₄	O ₂ mg/l	5,0	3
Vanadij*	µg/l	5,0	
Vodikov sulfid*	mg/l	0,05	
Vodljivost	µS/cm /20 °C	2500	1
Željezo	µg/l	200,0	
Broj kolonija 22 °C	Broj / 1 ml	100	11
Broj kolonija 36 °C	Broj / 1 ml	100	11
Ukupni koliformi*	broj/100 ml	0	
Pseudomonas aeruginosa	broj/100 ml	0	12

Napomene uz prethodnu tablicu

M.D.K. – skraćenica za maksimalno dopuštenu koncentraciju

*ne određuje se u vodama u boci ili drugoj ambalaži

Napomena 1. – Voda ne smije biti agresivna.

Napomena 2. – Za vode koje se pune u boce ili drugu ambalažu, minimalna vrijednost se može smanjiti do 4,5 pH. Za vodu koja se puni u boce ili drugu ambalažu, a koja je prirodno ili umjetno bogata ili obogaćena ugljičnim dioksidom, minimalna vrijednost može biti niža.

Napomena 3. – Ovaj parametar nije potrebno mjeriti ako je parametar TOC analiziran, s iznimkom ako to nalažu stručni razlozi.

Napomena 4. – Ovaj parametar nije potrebno mjeriti kod opskrbe vodom koja je manja od 10 000 m³/dan.

Napomena 5. – U slučaju obrade površinskih voda potrebno je postići vrijednost koja ne prelazi 1,0 NTU (jedinice nefelometrijske mutnoće) u vodi neposredno nakon postrojenja za obradu.

Napomena 6. – U slučaju utvrđene pojave fenola radit će se utvrđivanje količine i vrste. Za tumačenje dobivenih rezultata koriste se preporuke Svjetske zdravstvene organizacije.

Napomena 7. – M.D.K. vrijednost za srebro je 100 µg/l, ukoliko se koristi kao dezinfekcijsko sredstvo.

Napomena 8. – Za tumačenje dobivenih rezultata koriste se preporuke Svjetske zdravstvene organizacije.

Napomena 9. – Parametar ugljikovodici podrazumijeva zasićene ugljikovodike (razgranati i ravnolančani alkani i niže supstituirani benzeni (C1 i C2 supstituenti: toluen, etilbenzen i ksileni).

Napomena 10. – ne određuje se kod ispitivanja vode sa vodocrpilišta.

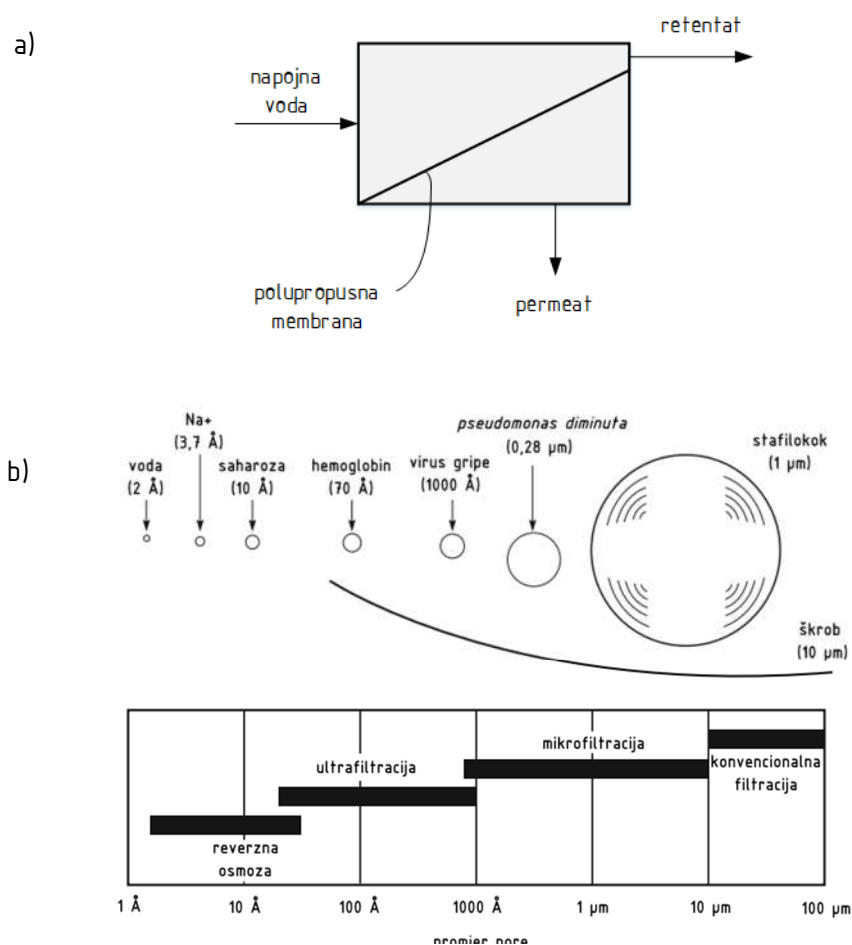
Napomena 11. – u vodi u bocama koja je stavljena na tržište M.D.K. vrijednost parametra je »bez nenormalnih promjena«.

Napomena 12. – određuje se u uzorcima vode uzetim na mjestu potrošnje u objektima od javnozdravstvenog interesa (bolnice i druge zdravstvene ustanove, vrtići, starački domovi i druge javne ustanove u kojima su na smještaju starije osobe) i za potrebe tehničkih pregleda.

2. MEMBRANSKA FILTRACIJA

2.1. Općenito

Filtracija je postupak odvajanja heterogenih mješavina tekućih i čvrstih tvari pomoću šupljikave pregrade (filtracijskog sredstva) koja je propusna samo za određenu vrstu komponenata tih mješavina (filtrat) [8]. Filtracija kao proces može biti poznata iz prosijavanja brašna, filtra za kave iz aparata ili pripreme čaja kada on nije u klasičnom pakiranju u obliku vrećice. Filtracija može biti na granuliranom mediju kad se voda propušta kroz takav sloj nakon prethodne obrade koagulacijom, flokulacijom, sedimentacijom ili flotacijom. Kada postoji određena barijera koja je i dalje djelomično propusna te odjeljuje dva medija koji imaju različite sastave te su pogonjeni tom razlikom i razlikom tlakova onda se takva filtracija naziva membranskom.



Slika 3: a) Principijelna shema filtracije pomoću membrane;
b) Prikaz veličina nekih specifičnih tvari te mogućnosti njihove obrade [9]

Osnovni princip djelovanja membrana za filtraciju dan je na Slici 3 pod a). Ulazna struja u membranu naziva se napojna voda, dio ulazne struje koji prolazi kroz membranu naziva se permeat, a dio ulazne struje koji je membrana zadržala naziva se retentat. Na Slici 3 pod b) prikazane su najčešće tvari koje se odvajaju filtracijama, njihova međusobna usporedba te mogućnosti njihova uklanjanja.

Današnji trendovi u obradi vode za ljudsku potrošnju razlikuju četiri vrste membranskih procesa koji su pogonjeni razlikom tlakova: mikrofiltracija, ultrafiltracija, nanofiltracija i reverzna osmoza. Prva dva procesa mogu se svrstati u grupu membranske filtracije, a druga dva u grupu reverzne osmoze [10]. Zadaća prve grupe procesa je uklanjanje čestica te mikroorganizama, tipični membranski pad tlaka je od 0,2 do 1 bara, a korisnost uklanjanja nečistoća skoro je savršena. Druga grupa služi za desalinizaciju morske vode, umekšavanje vode i uklanjanje nekih posebnih čestica. Korisnost procesa uklanjanja ovdje se kreće u rasponu od 50% za morske vode do 90% za obojane bunarske vode te su tlakovi puno veći nego u prvoj grupi, a kreću se u rasponu od 5 do 85 bara. Mikroporozne membrane patentirane su u 20-im godinama prošlog stoljeća, ali su bile ograničene na laboratorijsku uporabu sve do 50-ih godina [9]. Njihove prvotne zadaće bile su prepoznavanje broja bakterija, uklanjanje mikroorganizama i čestica iz tekućina i plinova, frakcioniranje makromolekula kao što su proteini te za druga istraživanja. U široku industrijsku primjenu membranska filtracija dolazi kroz farmaceutsku industriju, a primjenu nalazi i u prehrambenoj industriji za čišćenje, steriliziranje i koncentriranje različitih proizvoda u proizvodnji voćnih sokova, mliječnih proizvoda, biljnih ulja i alkoholnih pića. Također, svoje mjesto membranske filtracije nalaze i u industrijskim procesima te obradi otpadnih tvari – ulja, natrijeva hidroksida i slično. U 80-im godinama prošlog stoljeća počinje uporaba i membranskih filtracija u pripremi čiste vode kada su zakoni počeli biti doista rigorozni što se tiče njihove kontrole kvalitete, ali treba spomenuti da se već u II. svjetskom ratu počelo istraživati u te svrhe zbog ratnih situacija gdje su vodovodni sustavi bili uništeni i kontaminirani [10]. Prednosti kao što su industrijska oprema i operacije koje uključuju jednoizlazne režime rada (engl. *dead-end*), membrane u obliku šupljih vlakana (engl. *hollow fiber*), protok izvana prema unutra te povratno pranje, učinile su membranske postupke značajno ekonomski isplativijima. Prvo membransko filtracijsko postrojenje u SAD-u uvedeno je u rad u saveznoj državi Kolorado s kapacitetom $225 \text{ m}^3 \text{ dan}^{-1}$, dok je u Europi prvo postrojenje s membranskom tehnologijom izvedeno u Francuskoj 1988. godine s kapacitetom

250 m³ dan⁻¹. Krajem tisućljeća ultrafiltracija i mikrofiltracija postaju komercijalno iskoristive i široko rasprostranjene.

2.2. Membranska transportna teorija

Najvažnije svojstvo membrana je njihova mogućnost kontrole brzine propuštanja različitih vrsta. Dva najvažnija modela kojima je opisan taj proces su tzv. *pore-flow* model u kojem su čestice pogonjene razlikom tlaka kroz sitne pore te drugi engleskog naziva *solution-diffusion* model u kojem je glavna pogonska sila razlika u koncentraciji između dvaju sredstava. Prvi je model egzistencijalniji za obradu pitkih voda jer se na njemu temelje procesi filtracije. Odvajanje čestica događa se zbog toga što one nisu dovoljno male da bi prošle kroz pore filtra [9]. U *solution-diffusion* modelu najvažnija prijenosna sila je difuzija, a zakon koji pobježe opisuje te pojave naziva se Fickovim zakonom te je prikazan jednadžbom (1). Predznak minus definira smjer difuzije koji govori da protok difuzijski ide u smjeru pada koncentracije.

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (1)$$

J_i – brzina prijenosa komponente i otopine ili protok [g cm⁻² s⁻¹]

$\frac{dc_i}{dx}$ – koncentracijski gradijent komponente i [g cm⁻⁴]

D_i – difuzijski koeficijent [cm² s⁻¹]

Sličan zakon vrijedi i za *pore-flow* model uz signifikantne promjene u vezi faktora koji su vezani za glavnu pokretačku silu – tlak. Ovaj zakon poznat je iz mehanike fluida kao Darcyjev zakon kojim se opisuju gubici u cjevovodu, ali uz neke preinake u odnosu na jednadžbu (2), a ponajviše uz predznak jer je tok određen pozitivnim padom tlaka.

$$J_i = K' c_i \frac{dp}{dx} \quad (2)$$

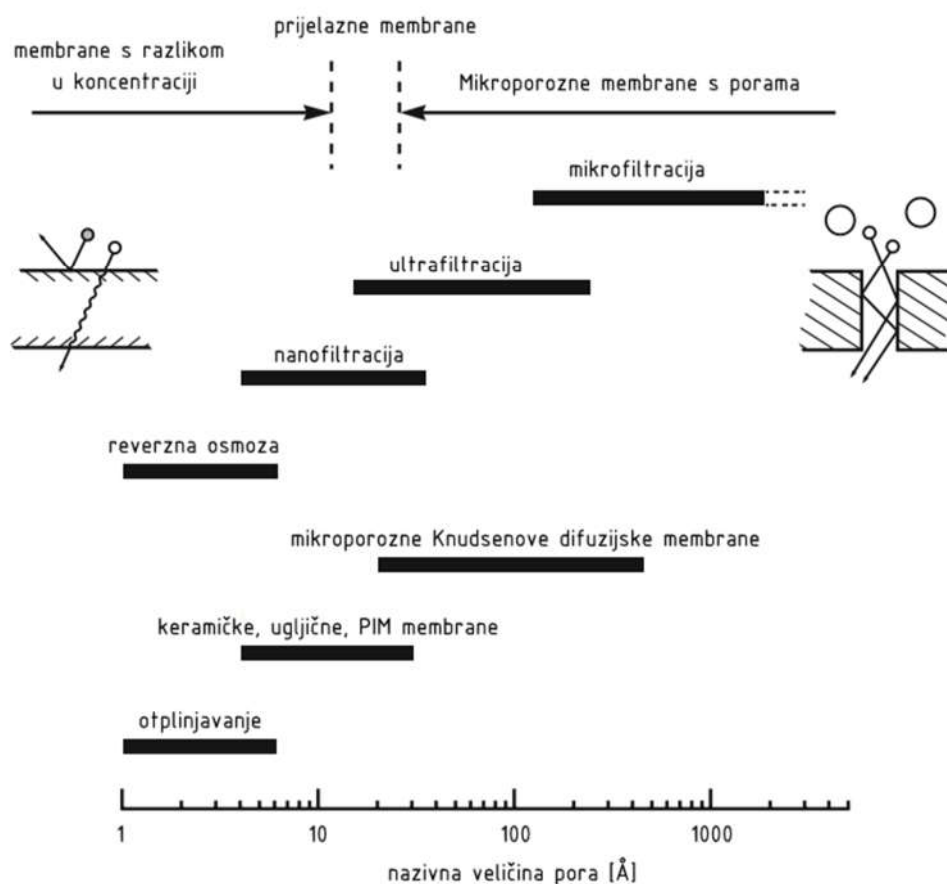
J_i – brzina prijenosa komponente i otopine ili fluks [g cm⁻² s⁻¹]

$\frac{dp}{dx}$ – gradijent tlaka u poroznom mediju [Pa cm⁻¹]

c_i – koncentracija komponente i [g cm⁻³]

K' – koeficijent koji se odnosi na vrstu medija [cm² Pa⁻¹ s⁻¹]

Razlika u ova dva modela nalazi se u veličini pora te njihovoj propusnosti. Za membrane kod kojih se transport najbolje opisuje Fickovim zakonom, pore koje se pojavljuju u membranama zapravo su maleni prostori između polimernih lanaca koji se šire odnosno sužuju u ovisnosti o toplinskom gibanju molekula polimera. Drugim riječima, takve membrane nisu stacionarne te ovise o uvjetima u kojima se nalaze. S druge strane, za membrane kod kojih je transport najbolje opisan Darcyjevim zakonom pore su relativno stacionarne svojom veličinom i u prostoru fiksne. Sama veličina pora često je teško izmjerljiva direktno te se ona može

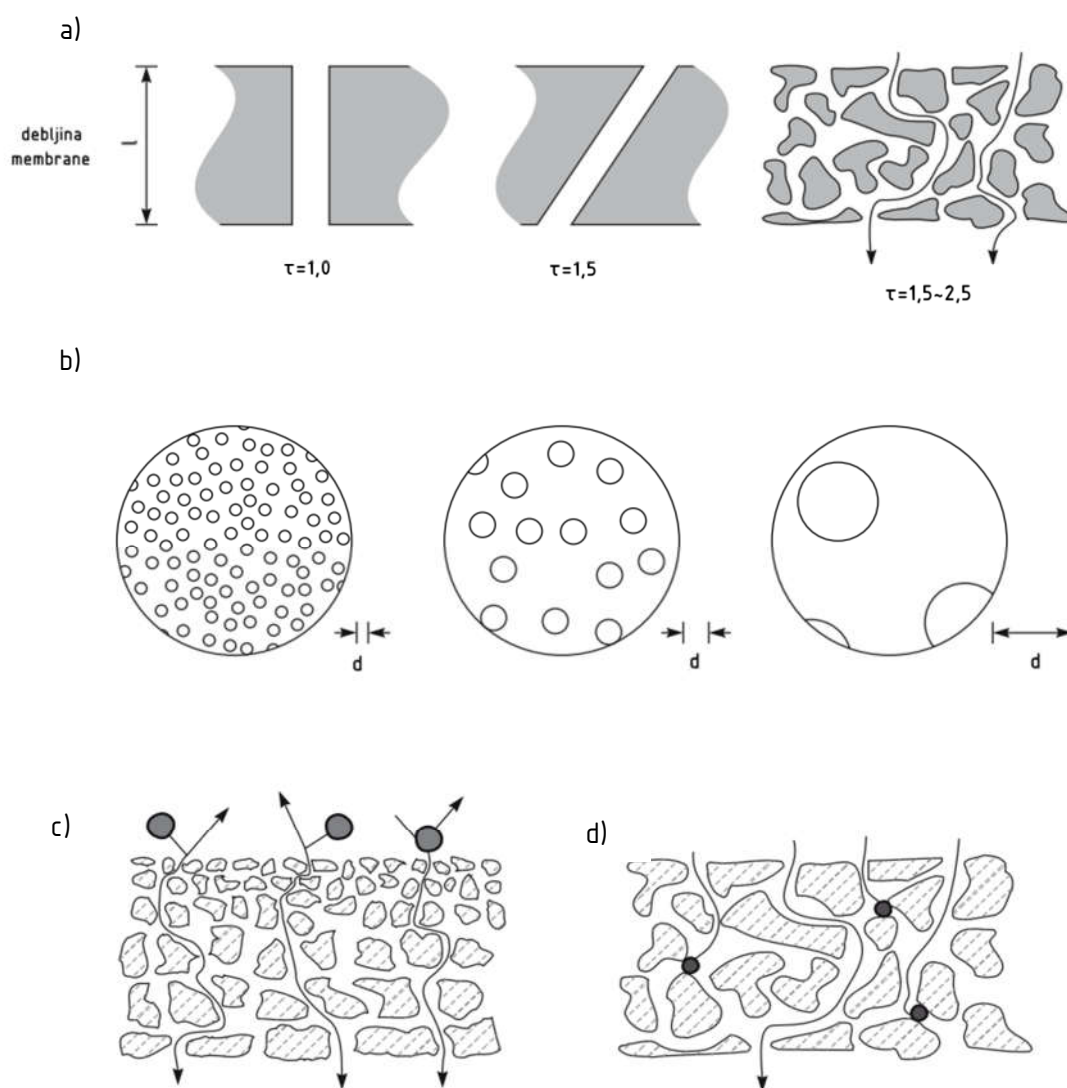


Slika 4: Prikaz postupaka u ovisnosti o veličini pora i modela transportne teorije [9]

izračunati veličinom čestica koje propušta što bi se moglo svrstati u neku indirektnu metodu. Prema veličini pora postupci se mogu svrstati u tri skupine od kojih su dvije pokrivene modelima te jedna koja je između, odnosno prijelazna grupa. U toj grupi nalaze se pore s promjerima od 5 do 10 Å. Tako na primjer nanofiltracija spada u tu grupu jer odlično filtrira trisaharide, saharozu i rafinozu s promjerom 10–13 Å, ali propušta neke druge molekule (npr. molekule promjera 5–6 Å kao što su neki monosaharidi). Parametri koji se koriste za fizičko opisivanje membrana, iako nisu savršeni, dobro opisuju neka značajna svojstva. Pomoću njih može se procijeniti određeno vrijeme koje je potrebno za prolazak kroz membranu, veličinu

korisne površine membrane i slično. Dva najznačajnija parametra su membranska poroznost i zavojitost membrane. Poroznost membrane je dio ukupnog volumena membrane koji je porozan. Tipične mikroporozne membrane imaju prosječnu poroznost u rasponu 0,3–0,7. Taj se broj može dobiti vaganjem membrane prije i nakon punjenja pora inertnom tekućinom. Međutim, prosječna poroznost može varirati od mjesta do mjesta te je ovako dobivenu prosječnu poroznost potrebno uzimati s oprezom. Zavojitost membrane opisuje duljinu prosječne pore u usporedbi s debljinom membrane. Jednostavne cilindrične pore koje su okomite na površinu membrane imaju vrijednost zakrivljenosti 1, tj. prosječna dužina pora jednaka je debljini membrane. Pore najčešće formiraju zavojitu putanju kroz membranu i stoga se tipična zavojitost membrane kreće u rasponu 1,5–2,5 (Slika 5a). Nadalje, vrlo važno svojstvo koje karakterizira mikroporoznu membranu je promjer pora. Iako se mikroporozne membrane uobičajeno karakteriziraju s jednom vrijednosti promjera pora, većina membrana zapravo sadrži raspon veličina pora. Kod membrana za ultrafiltraciju, deklarirani promjer pora je obično prosječna vrijednost, dok se kod membrana koje se koriste za mikrofiltraciju promjer pora definira u smislu najveće čestice koja još može prodrijeti kroz membranu.

Mikroporozne ultrafiltracijske i mikrofiltracijske membrane načelno se mogu podijeliti u dvije kategorije – membrane kod kojih se separacija odvija zbog razlike u veličini čestica i veličini pora membrane (Slika 5c) i membrane kod kojih se uklanjanje čestica odvija u unutrašnjosti membrane (Slika 5d). Membrane kod kojih se filtracija temelji na efektu prosijavanja (Sl. 5c) obično su anizotropne s relativno finim mikroporoznim površinskim slojem. Čestice promjera većeg od promjera pora membrane hvataju se i akumuliraju na površini membrane, dok manje čestice prolaze kroz površinske pore i ne bivaju uhvaćene u unutrašnjosti membrane (površinska filtracija). Separacija na drugoj kategoriji mikroporoznih membrana odvija se u njezinoj unutrašnjosti mehanizmom kao kod dubinske filtracije (Sl. 5d). Prosječni promjer pora često je deset puta veći od najmanje čestice koja može prodrijeti kroz membranu. Neke čestice ostaju zarobljene malim suženjima unutar membrane, a druge adsorpcijom prilikom prolaska kroz zavojitu poru membrane.



Slika 5: a) Poprečni presjeci membrana različitih zavojitosti; b) Površina membrana iste poroznosti, ali različitih promjera pora; c) Površinska filtracija; d) Dubinska filtracija [9]

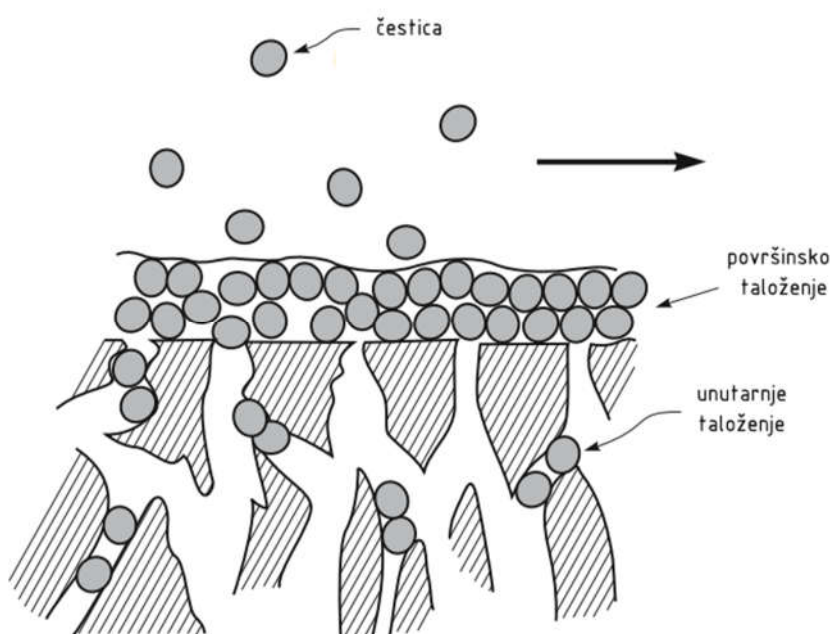
3. ULTRAFILTRACIJA

3.1. Kontekst

U posljednje vrijeme sve veći zamah u obradi voda dobivaju mikrofiltracija i ultrafiltracija. To najviše mogu zahvaliti svojim dobrim svojstvima kao što su niska cijena i bolje filtriranje traženih čestica nego konvencionalna filtracija [11]. Osnovna razlika između mikrofiltracije i ultrafiltracije je u veličini zadržanih čestica koju zorno prikazuje Slika 3. Glavni zadatak ultrafiltracije kao membranskog procesa je fizičko odvajanje koloida, virusa, bakterija, proteina te drugih većih molekula kao i bistrenje voda. Prosječna veličina pora membrana namijenjenih za ultrafiltraciju iznosi 10–1000 Å. Prvu sintetičku membranu od celuloznog nitrata formirao je početkom 20. stoljeća Bechhold. U periodu do 60-ih godina istog stoljeća ovakve membrane bile su dostupne samo u laboratorijskim istraživanjima, no uskoro započinje njihova šira komercijalna primjena. Krucijalan pomak u ovoj industriji događa se 1963. kada razvojem anizotropnih celulozno acetatnih membrana za reverznu osmozu Loeb i Sourirajan potiču razvoj sličnih membrana za ultrafiltracijske postupke koju godinu kasnije [9]. Materijali od kojih su tadašnje membrane izrađene u mnogome se koriste i danas, a to su polietersulfon (PES), poliviniliden fluorid (PVDF) te polietilen visoke gustoće (PEHD). Godine 1969. instaliran je prvi pogon s ultrafiltracijskim membranama u sklopu pogona *Koch Industries* za oporavak boja iz električnog premazivanja. Razvitkom membrana s konstantnim protokom, a promjenjivim tlakom koje sprječavaju blokiranje membrana (engl. *fouling*) počeo je i nagli razvoj ultrafiltracijskih membrana za potrebe obrada voda za ljudsku potrošnju. Druga primjena ovakvih postrojenja je za obradu kanalizacijskih voda u bioreaktorima. Osnovni parametri membranskog procesa su fluks ili specifičan protok permeata kroz membranu, permeabilnost membrane ili specifična produktivnost membrane te transmembranski tlak utrošen za transport filtrata ili permeata kroz membranu.

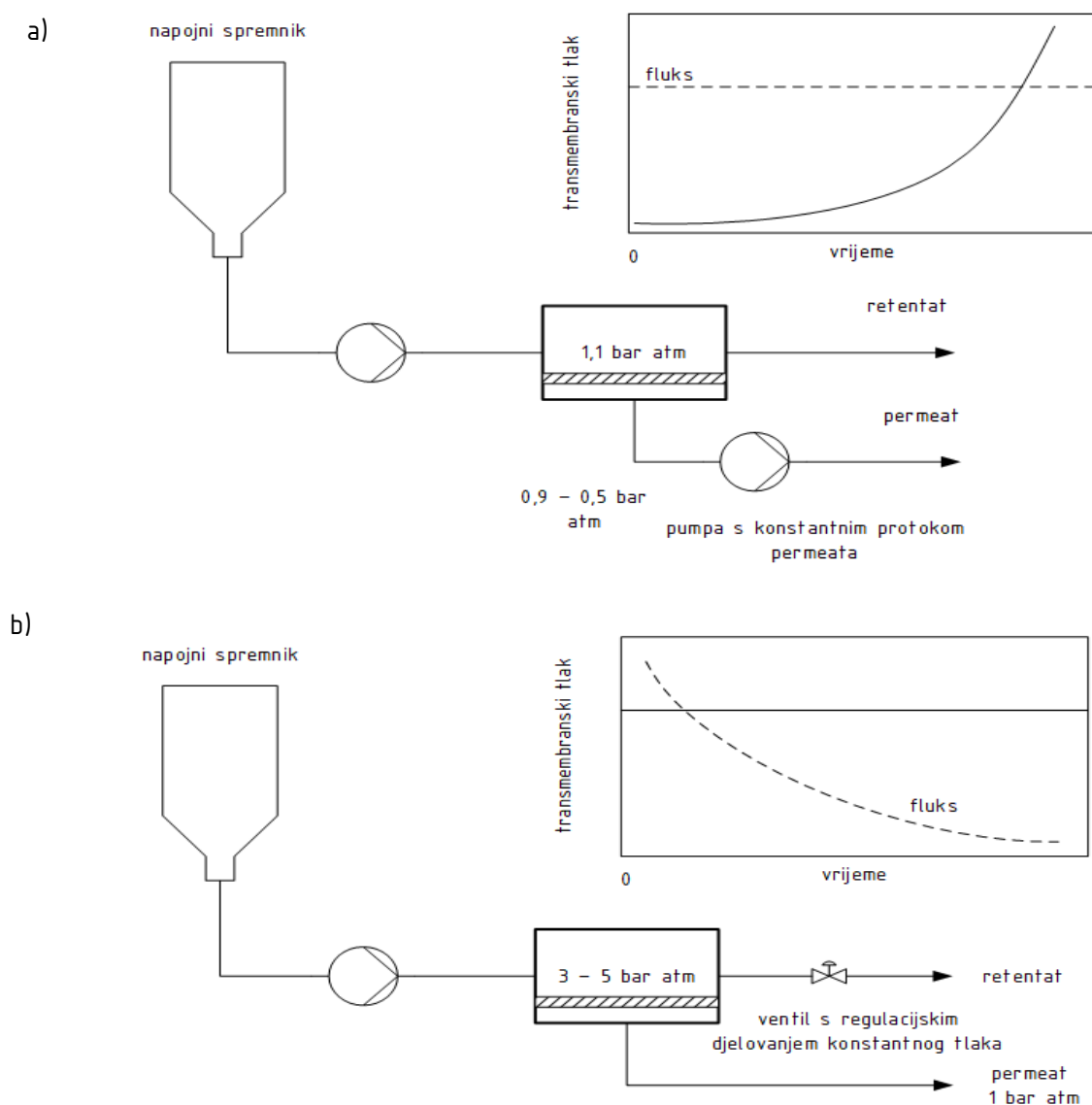
3.2. Taloženje na membranama

Sve do kraja prošlog stoljeća većina ultrafiltracijskih laboratorijskih sustava te svi industrijski membranski sustavi radili su pri konstantnom tlaku koji se kretao između 3 i 5 bara. Ključni faktor u vrednovanju takvih sustava bio je taloženje koloidnih čestica i makromolekula na površini membrane. Te čestice stvaraju svojevrsni gel na njezinoj površini te time sprječavaju filtracijski protok koji pada i do 10 puta u odnosu na nazivni [9]. U prvoj fazi nastaje smanjenje protoka zbog taloženja unutar membrane, dok u drugoj fazi ono postaje površinsko te se taj sloj očvršćuje novim česticama, put vodi se blokira te taj sloj postaje nepropusna barijera za daljnju filtraciju. Prva faza je nepovratan proces dok se druga faza, ona površinska, može povratiti čišćenjem. Ovakve slojeve na membrani moguće je kontrolirati u režimu visoke turbulencije, redovitim čišćenjem te primjenom hidrofilnih ili nabijenih membrana s ciljem smanjenja adhezije.



Slika 6: Prikaz taloženja na površini membrane te unutarnjeg taloženja [9]

Nakon 1995. godine uvodi se različiti postupak kod ultrafiltracijskih i mikrofiltracijskih membrana – počinje se primjenjivati sustav s konstantnim protokom (fluksom), ali varijabilnim tlakom. U ovakvom sustavu ulazna struja (napojna kapljevina) ulazi u membranski sustav s nižim tlakom, a podtlak u odnosu na atmosferski tlak na strani permeata održava pumpa. Protok kroz membranu održava se konstantnim upravo pomoću pumpe na strani permeata. Ta pumpa mora raditi jače što je taloženje veće kako bi provukla kapljevину kroz membranu pri čemu tlak na strani permeata pada te dolazi do porasta transmembranskog tlaka (TMP) na membrani. U nekom trenutku TMP naraste do neke prethodno definirane vrijednosti, sustav se isključuje te započinje postupak čišćenja membrane. Vrijeme između čišćenja definirano je tlakom i fluksom [9].



Slika 7: Sheme i dijagrami rada sustava principom konstantan fluks a) i konstantan tlak b) [9]

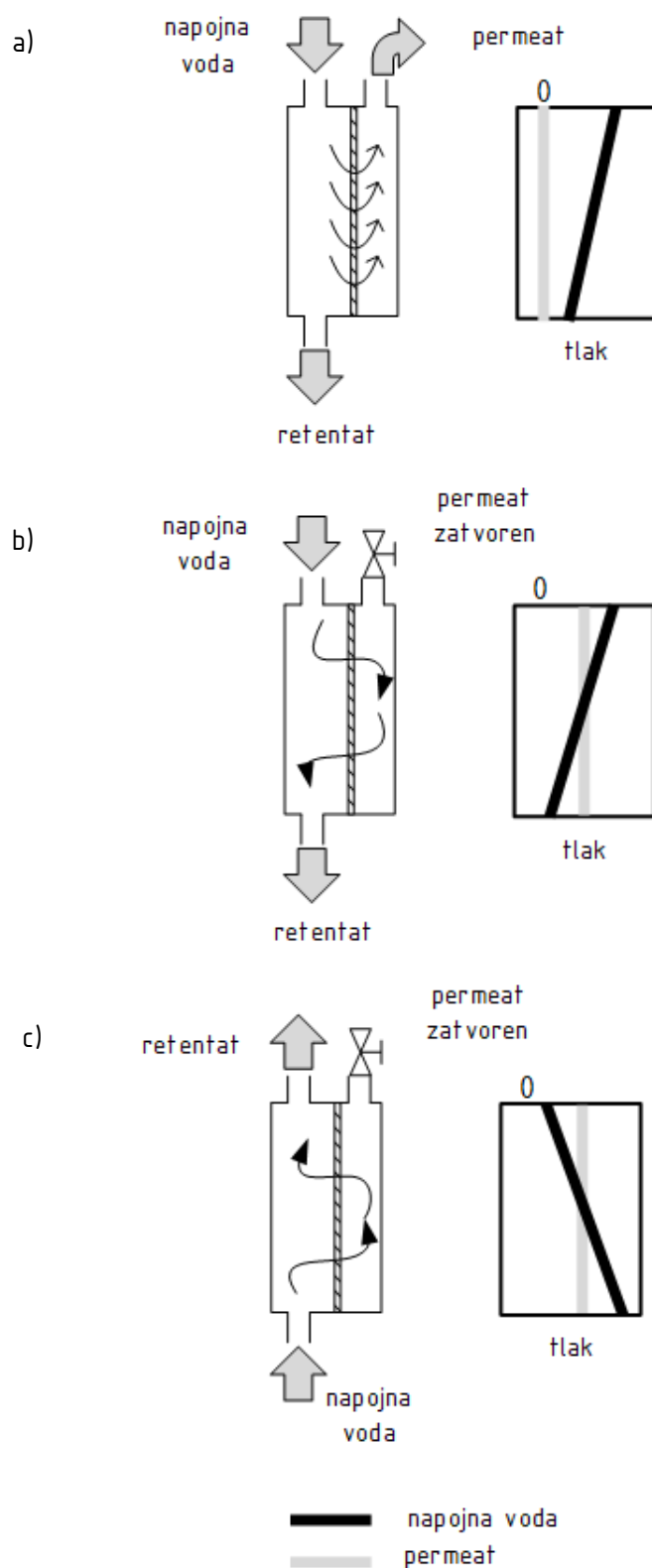
Postoji nekoliko metoda čišćenja pomoću kojih se može ukloniti takav sloj filtracijskih ostataka s membrane. Najjednostavnija metoda je periodično čišćenje prikladnom otopinom u vremenu od 1 do 2 sata, ali najviše upotrebljavana metoda je ona s lužnatim otopinama. Slijedi ju metoda s vrućim otopinama deterdženta [9]. Enzimatski deterdženti posebno su učinkoviti kod slojeva bogatih nefiltriranim proteinima. Redovito i pravovremeno čišćenje važno je za održavanje karakteristika svih ultrafiltracijskih membrana. Učestalost čišćenja membrane ovisi o njezinoj primjeni i kreće se od ciklusa na dnevnoj bazi (prehrambena industrija) do jednom mjesečno ili čak rjeđe što je čest slučaj kod primjene ultrafiltracijskih membrana za poliranje vode u sustavima za pripremu ultračiste vode.

Tipičan ciklus pranja membrane

- I Ispiranje sustava naglim mlazom vruće vode i to s najvećom mogućom brzinom.
- II Tretiranje sustava kiselom ili lužnatom otopinom, ovisno o prirodi sloja.
- III Tretiranje sustava vrućom otopinom deterdženta.
- IV Ispiranje vodom kako bi se uklonili ostaci deterdženta. Mjerenje protoka čiste vode kroz membrane pod standardnim uvjetima eksploatacije. Ako fluks nije zadovoljavajući ponoviti korake I–III.

Ultrafiltracijski sustavi ne bi smjeli biti pušteni iz rada ako nisu oprani, ponajviše se to odnosi na opasnost od rasta bakterija na membranama. Naime, membrane ostaju vlažne, a otopine za završno ispiranje trebale bi sadržavati bakteriostatik, npr. 0,5% formaldehida, za sprječavanje rasta bakterija. Povratno ispiranje (engl. *backflushing*) u posljednje vrijeme sve se više koristi kao mjera za sprječavanje taloženja na membranama, posebno za kapilarne i keramičke membrane. Povratno ispiranje se ne koristi za membranske module koji su pakirani u obliku spiralnog namotaja zato što se mogu lako oštetiti ovim postupkom.. Primjenjuje se mali predtlak na strani permeata zbog kojeg se formira smjer strujanja otopine od strane permeata na stranu napojne vode. Protok otopine mora biti pažljivo odabran kako ne bi naštetio membrani, a pretlak se uobičajeno kreće u rasponu vrijednosti 0,2–0,5 bara. U literaturi se navode tri uobičajena načina ispiranja membrana, a oni su prikazani na Slici 8. Sva tri načina temelje se na odvajanju naslaga na membranama pomoću razlike tlakova odnosno sile nadolazećeg medija. U normalnom radu membrane, javlja se pad tlaka od 0,2 do 0,5 bara između ulazne struje (engl. *feed*) i struje retentata (Slika 8a). Ova razlika tlakova

nastaje zbog prolaska ulazne struje kroz modul. Ako se zatvaranjem ventila spriječi izlaz struje permeata iz modula, na toj strani doći će do porasta tlaka na vrijednost koja se nalazi između vrijednosti tlaka ulazne struje i tlaka struje retentata. Tako nastane mali pretlak na jednoj strani modula, odnosno mali podtlak na njegovom drugom kraju (Slika 8b). Ovakva raspodjela tlakova osigurava uvjete za povratno ispiranje u kojima se nastali permeat iz jedne polovice modula koristi kao sredstvo za povratno ispiranje u drugoj polovici istog modula (donji dio). Promjenom smjera uvođenja ulazne struje u modul (smjer strujanja odozdo prema gore), ostvaruje se povratno ispiranje druge polovice modula, tj. njegovog gornjeg dijela (Slika 8c).



Slika 8: Načini čišćenja membrana protupranjem; a) standardni način , b) normalni tok uz protupranje na donjem dijelu membrane te c) suprotni tok uz protupranje na gornjem dijelu [9]

3.3. Strukture membrana i načini rada

3.3.1. Materijali

Osim već spomenutih materijala samih membrana kao što su polietersulfon (PES), poliviniliden fluorid (PVDF) te polietilen visoke gustoće (PEHD), membrane se još izrađuju od polipropilena (PP) i keramičkih materijala. Općenito, materijali za izradu membrana u svrhu obrade voda mogu se podijeliti u dvije velike skupine, polimerni i keramički materijali [11]. Polimerne materijale karakterizira lagana i tanka struktura koja ne zahtjeva puno prostora. Primjenjuju se za gotovo sve geometrije membranskih paketa, a najrašireniji materijali su PVDF, PP, PES, polisulfoni (PS) te celulozni acetat (CA). Svi navedeni materijali su više-manje hidrofilni te su dobro otporni na taloženje. Mogu izdržati široke raspone pH vrijednosti od 2 do 13, PVDF su nešto osjetljiviji na lužnatije otopine te mogu podnijeti pH do 11, a CA obavlja dobro funkcije unutar pH vrijednosti 5–8. PS membrane su jedne od najraširenijih zbog svojih dobrih svojstava, relativno visoke tolerancije na pH i temperature (čak do 75 °C) [11]. Vrlo su otporne su na oksidaciju bez obzira radi li se o kloru ili drugim oksidansima koji se uobičajeno koriste u obradi voda. Keramičke membrane napravljene su postupkom sinteriranja anorganskog materijala koji je pretvoren u krhku sitnu keramičku strukturu. Najčešći materijali su aluminijevi, titanijevi, cirkonijevi ili ugljikovi oksidi. Keramičke membrane mogu pružati veći otpor prolasku napojne kapljevine i stoga mogu zahtijevati veći transmembranski tlak za održavanje željenog fluksa, ali su jednostavnije za čišćenje i održavanje od polimernih membrana. Daljnje prednosti su u visokoj temperaturnoj otpornosti koja doseže i do 100 °C, ali i u otpornosti na široki raspon pH vrijednosti. Za odabir primjerene membrane važno je poznavati morfološka svojstva kao što su poroznost i hrapavost površine, oblik, veličina te rasprostranjenost pora te svojstva koja proizlaze iz eksploatacije, kao na primjer fluks čiste vode.

3.3.2. Geometrija

U tehnologijama obrade voda pojavljuje se pet vrsta geometrijskih paketa koji definiraju svojstva svakog modula:

- a) spiralni modul (engl. *spiral wound*)
- b) cijevni modul (engl. *tubular*)
- c) modul sastavljen od šupljih vlakana (engl. *hollow fiber*)
- d) modul u obliku ploče i okvira (engl. *plate and frame*)
- e) kazetni modul (engl. *cassette*).

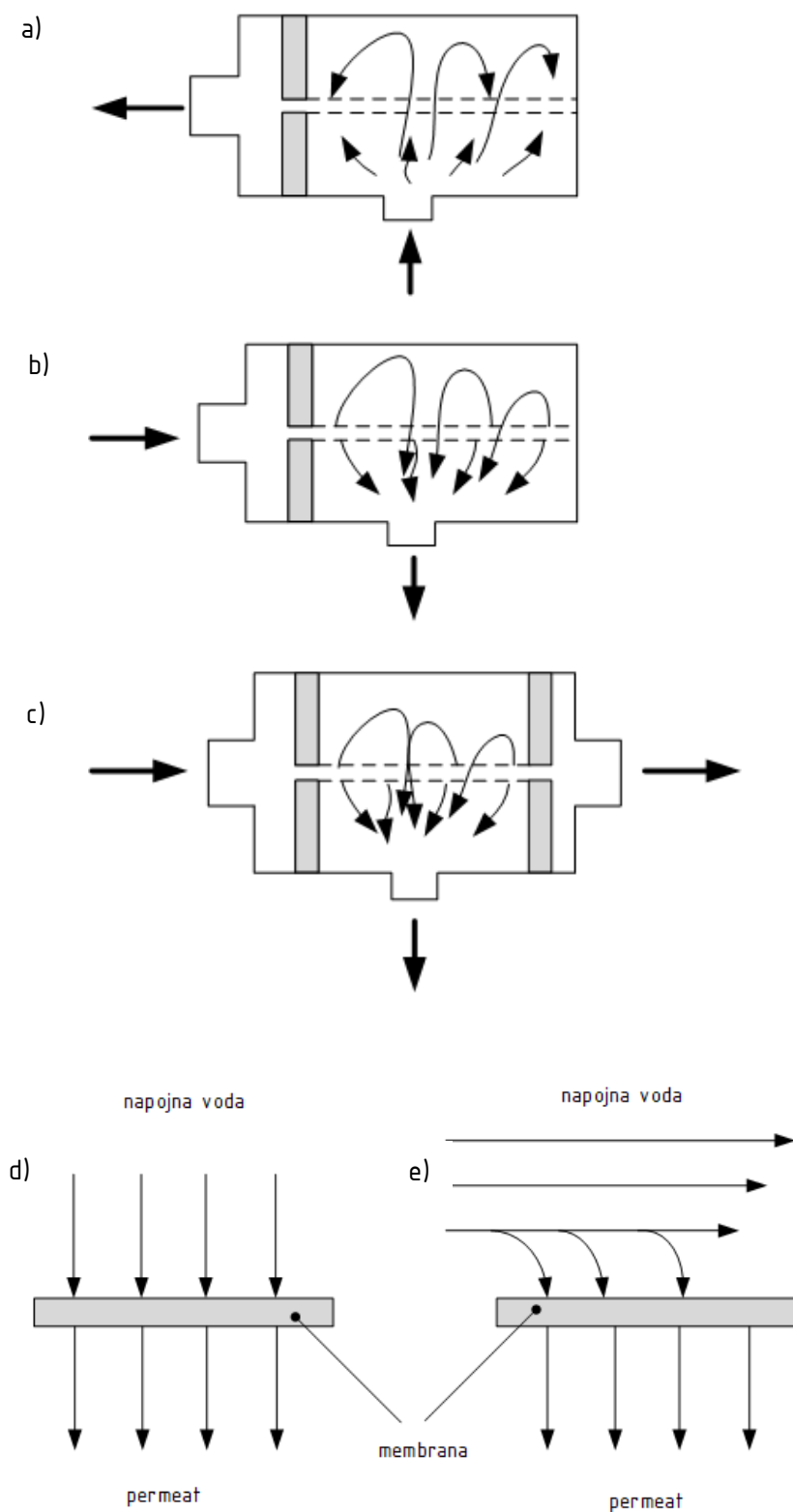
Modul sastavljen od šupljih vlakana sastoji se od nekoliko stotina do nekoliko tisuća cjevčica povezanih u jednu cjelinu koja je na rubovima spojena epoksidnom ili uretanskom smolom. Unutarnji promjeri cjevčica su od 0,4 do 1,5 milimetara kako bi mogli izdržati velike tlakove [11]. Fizička struktura ovakvih membrana dopušta povratno ispiranje, a dva su osnovna režima iznutra prema van (engl. *inside-out*) te izvana prema unutra (engl. *outside-in*). Male brzine do $2,5 \text{ m s}^{-1}$, velika površina u odnosu na volumen ili gustoća pakiranja ($750\text{--}1700 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$), mogućnost povratnog ispiranja, mali transmembranski tlakovi od 0,2 do 1 bar te mali padovi tlaka duž modula do 1 bara čine ovakve membrane dobre i široko upotrebljive [10]. Najveći nedostaci su upravo u malim dimenzijama i mnogobrojnosti osnovnih jedinica jer to znači lako gušenje protoka i težak pronalazak kvara. Smjer toka iznutra prema van zbog toga što se kreće unutar zadane površine pogodniji je za finiju regulaciju, a lakše je i povratno ispiranje. Membrane sa cijevnim modulima slične su prethodnim, a razlikuju se u promjeru cijevi koji je za red dimenzije veći i iznosi od 1 do 2,5 centimetara čime postaju lakše za održavanje i čišćenje. Same membrane smještene su u okvir od nehrđajućeg čelika ili vlaknima ojačane plastike, a princip filtriranja je isti kao i u membrana sa šupljim vlaknima. Napojna voda prolazi kroz unutrašnjost membrane te se permeat skuplja s vanjske strane. Brzine strujanja su oko 5 m s^{-1} što povećava Reynoldsov broj te automatski režim strujanja, što pogoduje kontroli i sprječavanju taloženja na membranama. Membrane s cijevnim modulima skuplje su po jedinici površine u odnosu na ostale mogućnosti slaganja membrana, a imaju i nisku gustoću pakiranja ($400\text{--}800 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$) [10].

3.3.3. Načini rada

Za module od šupljih vlakana može se definirati način rada prema strujanju napojne vode, permeata i retentata [10]. Kod filtracije s ukriženim protokom (engl. *cross flow*) napojna kapljevina uvodi se velikom brzinom u modul u smjeru strujanja iznutra prema van dok je kod filtracije s jednoizlaznim strujanjem (engl. *dead end*) tok napojne kapljevine okomit na površinu membrane pri čemu se ne formira tok retentata. Brzina tangencijalnog toka kreće se tipično u rasponu od 0,5 do 1 m s^{-1} te je otprilike četiri reda veličine veća od brzine kapljevine prema površini membrane. Ova brzina, paralelna površini membrane, stvara smičnu silu koja onemogućuje stvaranje kolača na površini membrane. Na taj način se čvrste tvari ne nakupljaju značajno na njezinoj površini, već se odvođe sa strujom retentata te sustav može raditi s većim fluksom ili dužim intervalima između protupranja.

Filtracija se događa kada voda prolazi kroz stijenkiju šupljih vlakana. Neki su proizvođači osmislili membranske sustave za filtriranje izvana prema unutra (napojna voda je izvan

vlakana, a permeat je unutar vlakna), dok su drugi proizveli sustave za filtriranje u suprotnom smjeru (iznutra prema van). Kod izvedbe sa smjerom toka izvana prema unutra, membrane u obliku šupljih vlakana manje su osjetljive na prisutnost čvrstih tvari u napojnoj vodi i mogu obraditi pri istome fluksu više vode jer je vanjska površina vlakana veća od unutarnje. Kao nedostatak ovakve konfiguracije protoka (izvana-unutra) može se navesti da ne može raditi na principu ukriženog protoka. Prednost konfiguracije iznutra-van kod filtracije s jednoizlaznim strujanjem očituje se u nižim operativnim troškovima [10]. Najznačajnija prednost konfiguracije iznutra-van kod filtracije s ukriženim protokom je da može raditi s višim fluksevima i to pri višim mutnoćama napojne vode jer se zbog formiranja tangencijalnog toka čvrste tvari dobro ispiru i time smanjuje utjecaj tih čestica na formiranje kolača na površini membrane.



Slika 9: Prikaz strujanja unutar modula: a) princip izvana-unutra, b) jednoizlazni princip iznutra-van, c) ukriženi princip iznutra-van; prikaz strujanja u odnosu na membranu: d) jednoizlazno, e) ukriženo [10]

4. PRORAČUN POSTROJENJA

4.1. Parametri bunarske vode

Tablica 3: Parametri bunarske vode kao ulazni podaci u proračun

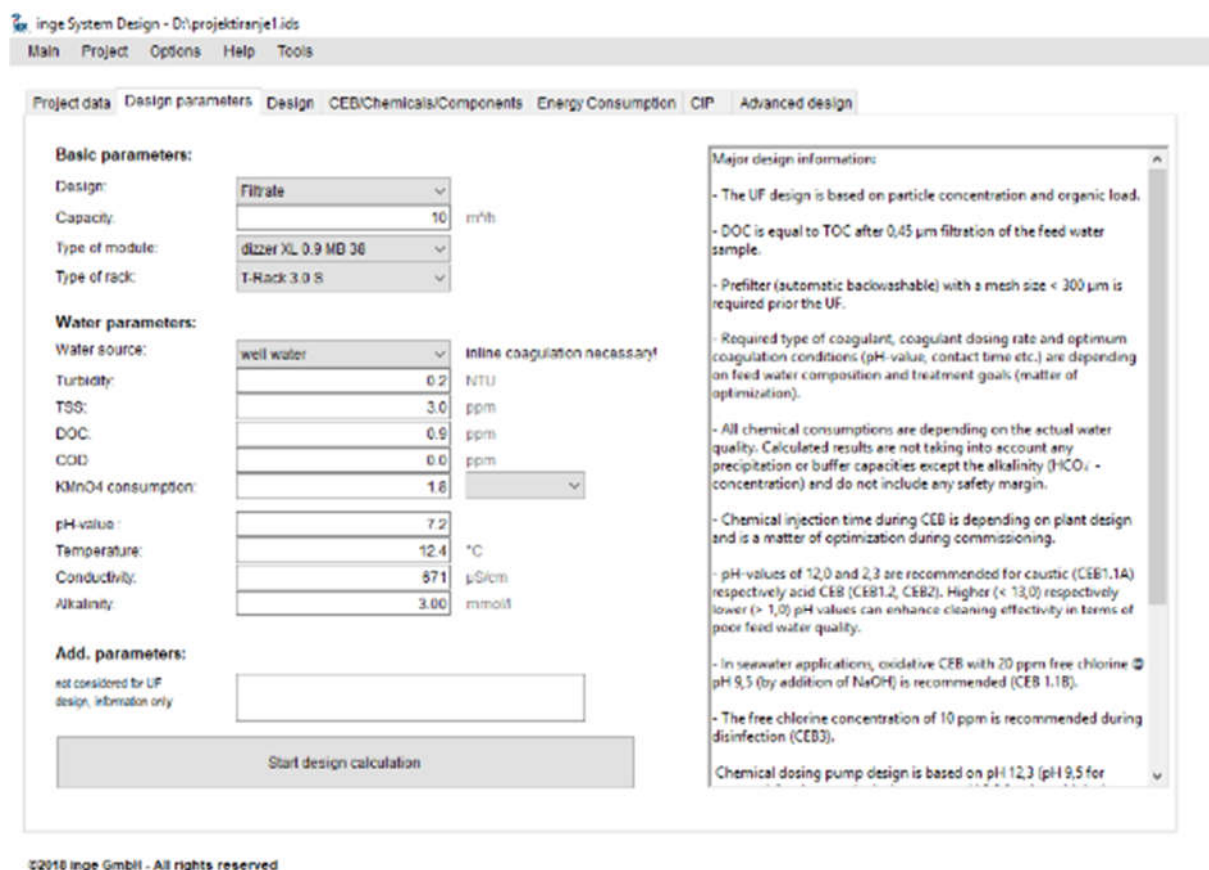
pokazatelj	vrijednost	jedinica
temperatura	12,4	°C
pH vrijednost	7,2	-
ukupne suspenzije (TSS)	3	mg L ⁻¹
električna provodnost	671	μS cm ⁻¹
mutnoća	0,23	NTU
otopljeni organski ugljik (DOC)	0,9	mg L ⁻¹
utrošak KMnO₄	1,84	mg L ⁻¹ O ₂
ukupna tvrdoća	319	mg L ⁻¹ CaCO ₃
alkalitet	3	mmol L ⁻¹
ukupni koliformi	9	br/100 mL
<i>Escherichia coli</i>	0	br/100 mL

Već spomenutim Pravilnikom o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe (u daljnjem tekstu: Pravilnik) propisane su maksimalne dozvoljene vrijednosti za sljedeće parametre: temperatura, koncentracija vodikovih iona ili pH vrijednost, ukupno otopljene suspenzije, električna provodnost, mutnoća, utrošak KMnO₄ te ukupni koliformi. Upravo su potonji jedini parametar koji iskače iz dopuštenih vrijednosti. Koliformne bakterije odgovorne su za pravilnu probavu hrane te najčešće obitavaju u debelom crijevu. One su primarno nepatogene i uvjetno prijenosnik infekcija jer ne moraju nužno nositi klicu zaraze već uz pojavnost neke druge bolesti mogu samo pogoršati situaciju. *Escherichia coli* drugi je zdravstveni pokazatelj ispravnosti vode za piće te je indikator zagađenosti vode fekalijama. Izaziva infekcije mokraćnog mjehura, a kao i koliforma prema pravilniku ne smije ih biti u vodi za ljudsku potrošnju. Alkalitet je usko povezan s tvrdoćom vode te predstavlja sposobnost neke tvari da neutralizira kiselinu. Čine ga alkalne soli tj. one koje mogu prihvaćati protone. Mjeri se utroškom standardne otopine do određene završne točke titracije. Postoje dvije vrste alkaliteta, a dijele se prema pH vrijednosti završne točke titracije na m-alkalitet i p-alkalitet. Nižim pH vrijednostima (4,2–4,5) odgovara m-alkalitet kojem je indikator metiloranž, a višim vrijednostima (8,2–8,4) odgovara p-alkalitet te indikator fenolftalein [2]. Ukupna tvrdoća predstavlja sumu kalcijeve i magnezijeve tvrdoće u vodi. S druge strane, postoji karbonatna i ostatna tvrdoća. Karbonatnu

tvrdću čine kalcijevi i magnezijevi bikarbonati i karbonati kao dio ukupne tvrdoće dok je ostatna tvrdoća posljedica ostalih soli, a to su sulfati, kloridi, nitrati i silikati. Ako je ukupna tvrdoća veća od alkaliteta onda je karbonatna tvrdoća jednaka tom alkalitetu. U suprotnome, ako je ukupna tvrdoća manja od alkaliteta tada je ukupna tvrdoća i karbonatna. Tvrdoća nema utjecaja na samu zdravstvenu ispravnost vode te time nije navedena njena M.D.K. u indikatorskim parametrima, ali utječe na reakciju sa sapunom te se ova konkretna voda smatra tvrdom [12]. S obzirom na to da se sadržaj organske tvari u vodi ne može direktno kvantificirati, smišljen je način pomoću kalijeva permanganata. On svojom razgradnjom u vodi oslobađa kisik koji oksidira prisutnu organsku tvar te se na temelju njegove potrošene količine procjenjuje sadržaj organske tvari [13]. Mutnoća i ukupne suspenzije, također su povezani parametri. Naime, mutnoća izražena u NTU mjernim jedinicama može izazvati malo nedorečenost jer ona se mjeri nefelometrijski te u principu mjeri mutnoću izazvanu česticama koje su ostale slobodno se gibati cijelim volumenom pa tako i područjem u koje udara snop tubidometra. Ukupne suspenzije daju puno bolju sliku o česticama koje izazivaju mutnoću u vodi. Pravilnikom je ova vrijednost ograničena na 4 NTU dok za pitke vode ona mora biti ispod 1. Električna provodnost bitan je parametar za procjenu mineralizacije vode te time određivanje vrste vode. Čišće vode imaju manju vodljivost, a to svojstvo ovisi o prisutnosti iona, o njihovoj ukupnoj koncentraciji, pokretljivosti i valenciji iona te temperaturi mjerenja. Otopine anorganskih spojeva većinom su dobri vodiči [12]. Temperatura je pravilnikom ograničena na 20 °C dok je optimalna vrijednost 15, a pH vrijednost u rasponu 6,5–9,5 što zazire u blago lužnato područje.

4.2. Osnovni proračun

Za potrebe proračuna korišten je računalni paket tvrtke Inge iSD – inge® System Design dostupan na njezinim službenim stranicama. Na Slici 10. prikazano je početno sučelje na kojem se jasno vide ulazni podaci te odabir modula te takozvanog T-postolja.



Slika 10: Početno sučelje inge® System Designa

Kao modul je odabran tip *dizzer XL 0,9 MB 38* što prema katalogskim podacima znači:

dizzer – naziv modula

XL – modul za primjenu u velikim postrojenjima

0,9 – promjer kapilare [mm]

MB – patentirano ime za modul sastavljen od šupljih vlakana (engl. *multibore*)

38 – aktivna membranska površina [m²]



Slika 11: Prikaz odabranog modula [14]

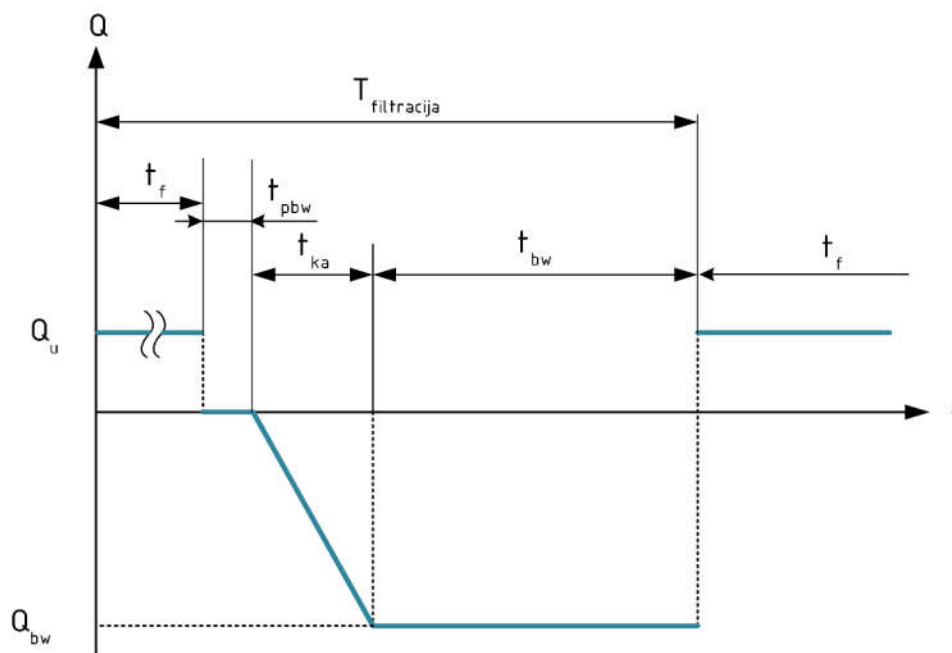
Tablica 4: Prikaz rezultata ciklusa filtracije dobivenih pomoću *inge® System Design*

predtretman	filtrar <300 μm		
konfiguracija sistema	konstantan protok		
naziv veličine	oznaka	mjerna jedinica	iznos
aktivna membranska površina jednog modula	A_m	m^2	38
ukupni broj modula	n_m	-	3
broj membranskih jedinica	n_{mj}	-	1
ukupna filtracijska površina ($=A_m n_m$)	A_u	m^2	114
prosječni protok napojne vode	Q_u	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	10
projektni kapacitet	Q_n	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	11
prosječni protok filtrirane vode	Q_i	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	10
Vrijeme filtracije	t_f	min	60
protok protupranja	Q_{bw}	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	26
vrijeme protupranja	t_{bw}	s	35
vrijeme pauze prije protupranja	t_{pbw}	s	5
kašnjenje armature	t_{ka}	s	14
prosječni protok otpadne vode od protupranja	Q_w	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	0,3
broj ciklusa u jednom danu	N_d	-	23

Osnovni filtracijski ciklus sastoji se od vremena potrebnog za filtraciju, vremena pauze prije protupranja, vremena potrebnog za djelovanje armature (ventil i pumpe) te vremena potrebnog za sam proces protupranja.

$$T_{\text{filtracija}} = t_f + t_{pbw} + t_{ka} + t_{bw} = 3600 + 5 + 14 + 35 = 3654 \text{ s} \approx 61 \text{ min} \quad (3)$$

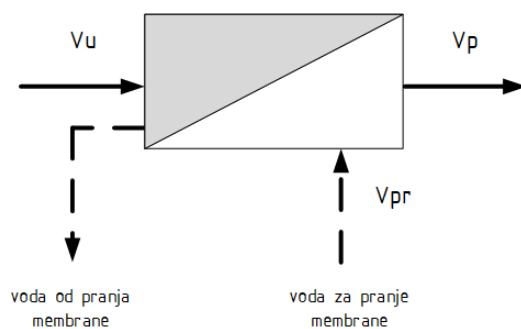
Prema izrazu (3) jedan ciklus filtracije traje 61 minutu što znači da se u jednom danu izvrši 23 puna ciklusa filtracije. Ta informacija kasnije će biti uključena u proračun spremnika za protupranje. Na Slici 12 prikazan je ciklus filtriranja, točnije protoci napojne vode i protupranja u ovisnosti o vremenu pri čemu je pozitivan protok definiran smjerom napojne vode i filtrata, a negativan protupranjem.



Slika 12: Shematski prikaz ciklusa filtriranja u ovisnosti o vremenu

Veličina koja dobro opisuje iskorištenje same membrane naziva se faktor konverzije (engl. *recovery* ili *conversion*). Taj faktor u obzir za jednoizlaznu filtraciju uzima volumene napojne vode, volumen filtrata, volumen vode potrebne za protupranje membrane te za ukriženu filtraciju uz navedene i volumen retentata za jedan ciklus. Njegova vrijednost za ultrafiltraciju najčešće je iznad 0,95 ili 95% [10]. Shematski prikaz veličina potrebnih za izračun faktora konverzije u slučaju jednoizlazne filtracije dan je na Slici 13, a izraz za izračunavanje definiran je jednadžbom (4). Izrazi od (5) do (7) predstavljaju pomoćne korake u izračunu faktora konverzije, a redom označavaju volumen napojne vode u jednom ciklusu, volumen permeata u jednom ciklusu te volumen vode potrebne za protupranje u jednom ciklusu. Dok je izrazom (8) dan konačan izračun faktora konverzije.

$$Y = \frac{V_p - V_{pr}}{V_u} \quad (4)$$



Slika 13: Shematski prikaz jednoizlazne filtracije

$$V_u = Q_u \cdot t = 10 \cdot \frac{61}{60} = 10,1667 \text{ m}^3 \quad (5)$$

$$V_p = Q_p \cdot t = 10 \cdot \frac{61}{60} = 10,1667 \text{ m}^3 \quad (6)$$

$$V_{pr} = Q_{bw}(t_{bw} + 0,5 \cdot t_{ka}) = 26 \left(\frac{35}{3600} + 0,5 \cdot \frac{14}{3600} \right) = 0,3033 \text{ m}^3 \quad (7)$$

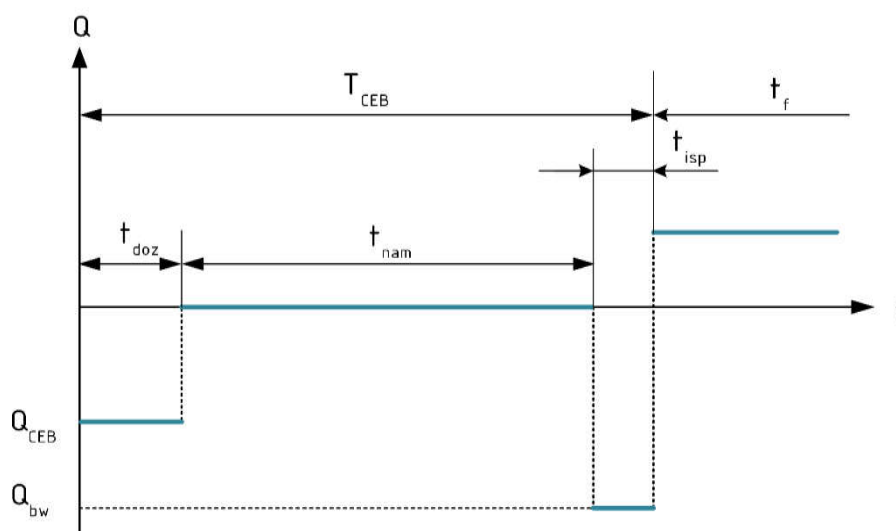
$$Y = \frac{10,1667 - 0,3033}{10,1667} = 0,9701 \quad (8)$$

4.3. Prikaz utroška kemikalija

Kako je ovo relativno dobra sirova voda i zadovoljava većinu pokazatelja zdravstvene ispravnosti vode, koagulacija i prethodna preobrada osim predfiltera nije potrebna kao ni kemijski tretman membrane oksidantom. U kemijskim pojačanom čišćenju korištena je kiselina HCl za uklanjanje kamenca i drugih mineralnih nakupina dok se lužina NaOH koristi za uklanjanje organskih onečišćenja na membrani. Period korištenja CEB-a je svaka 72 sata odnosno svaka tri dana i to tako da se nakon svaka 3 dana koristi druga vrsta CEB-a. Ostali podaci potrebni za proračun prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5: Prikaz rezultata kemijski pojačanog čišćenja dobivenih pomoću *inge® System Design*

vrsta CEB-a			lužina	kiselina
kemikalija			NaOH	HCl
naziv veličine	oznaka	mjerna jedinica	iznos	
koncentracija	γ	%	32	32
gustoća	ρ	g cm^{-3}	1,34	1,16
doziranje	Q_{doz}	L h^{-1}	19	12
učestalost	f_{CEB}	h	72	72
vrijeme doziranja	t_{doz}	s	90	90
fluks doziranja	F_{doz}	$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$	120	
vrijeme namakanja	t_{nam}	min	15	15
fluks ispiranja	F_{isp}	$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$	230	
vrijeme ispiranja	t_{isp}	s	60	60
protok vode i kemikalija za CEB	Q_{CEB}	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	14	



Slika 14: Shematski prikaz ciklusa CEB-a u ovisnosti o vremenu

Na Slici 14 prikazan je ciklus CEB-a, točnije protoci vode i kemikalija za CEB te protupranja u ovisnosti o vremenu pri čemu je pozitivan protok definiran smjerom napojne vode i filtrata, a negativan protupranjem. Izrazima od (9) do (12) definirani su utrošci kemikalija za jedan ciklus CEB-a i to redom: volumenska količina NaOH, masena količina NaOH te volumenska količina HCl i masena količina HCl.

$$V_{NaOH} = (Q_{doz})_{NaOH} \cdot t_{doz} = 19 \cdot \frac{90}{3600} = 0,475 \text{ L/ciklus} \quad (9)$$

$$m_{NaOH} = \rho_{NaOH} \cdot V_{NaOH} = 1,34 \cdot 0,475 = 0,6365 \text{ kg/ciklus} \quad (10)$$

$$V_{HCl} = (Q_{doz})_{HCl} \cdot t_{doz} = 12 \cdot \frac{90}{3600} = 0,3 \text{ L/ciklus} \quad (11)$$

$$m_{HCl} = \rho_{HCl} \cdot V_{HCl} = 1,16 \cdot 0,3 = 0,348 \text{ kg/ciklus} \quad (12)$$

S obzirom na to da je zbog relativno dobre sirove vode rijetka uporaba regeneriranja membrane pomoću CEB-a – svaki treći dan, uobičajena praksa određivanja utroška kemikalija na dnevnoj razini ne doima se praktičnom. Puno intuitivnijom se čini metoda računanja kemikalija na mjesečnoj razini čime je obuhvaćeno 10 ciklusa CEB-a u najgorem slučaju kada mjesec ima 31 dan. Izrazom (13) izračunat je broj ciklusa u mjesec dana, a izrazima (14) do (17) definirane su masene i volumne količine pojedinih kemikalija na mjesečnoj razini.

$$N_{ciklus,mj} = \frac{N_{sat,mj}}{f_{CEB}} = \frac{31 \cdot 24}{72} = 10,33 \approx 10 \text{ ciklus/mjesec} \quad (13)$$

$$\{V_{NaOH}\}_{mj} = V_{NaOH} \cdot N_{ciklus} = 0,475 \cdot 10 = 4,75 \text{ L/mjesec} \quad (14)$$

$$\{m_{NaOH}\}_{mj} = m_{NaOH} \cdot N_{ciklus} = 0,6365 \cdot 10 = 6,365 \text{ kg/mjesec} \quad (15)$$

$$\{V_{HCl}\}_{mj} = V_{HCl} \cdot N_{ciklus} = 0,3 \cdot 10 = 3,00 \text{ L/mjesec} \quad (16)$$

$$\{m_{NaOH}\}_{mj} = m_{NaOH} \cdot N_{ciklus} = 0,348 \cdot 10 = 3,48 \text{ kg/mjesec} \quad (17)$$

4.4. Proračun spremnika

U sustavu postoje dva spremnika za akumulaciju vodene mase. Prvi služi za akumulaciju vode za protupranje te je u funkciji svakodnevno i to u ovisnosti o trajanju ciklusa, a to je u konkretnom slučaju 23 puta dnevno. Pretpostavka za njega je da radi u svakom ciklusu i mehaničko protupranje i oba CEB-a uz odgovarajuće protupranje čime smo osigurali određeni faktor sigurnosti jer se svi navedeni procesi ne događaju svaki dan već svaki treći. Potreban volumen spremnika izračunat je prema izrazu (18) te ima rezervu za protupranje u vremenu 5 ciklusa te distribuiranje gotovog proizvoda u trajanju jedan sat. Odabran je spremnik *BP SCS 13500* volumena $13,5 \text{ m}^3$ tvrtke *Borplastika BP SCS 13500* [15].

$$V_{\text{spremnik1}} = Q_{bw}(t_{bw} + t_{ka}) + 2Q_{CEB} \cdot t_{doz} + Q_{isp} \cdot t_{isp} + Q_i \cdot t_f$$

$$= 26 \frac{(35+14)}{3600} + 2 \cdot 14 \cdot \frac{90}{3600} + 26 \cdot \frac{60}{3600} + 10 \cdot \frac{3600}{3600} = 11,487 \approx 11,5 \text{ m}^3 \quad (18)$$

Zadaća drugog spremnika je skladištiti otpadne vode nakon CEB-a te neposrednog ispiranja. Kako se u recipijent prema Pravilniku o graničnim vrijednostima emisija otpadnih voda, voda smije ispustiti u intervalu od 6,5 do 9 pH vrijednosti, taj će spremnik pomoću recirkulacijske pumpe regulirati pH vrijednost. Pretpostavka za njegovo dimenzioniranje je da se CEB obavlja svaki dan u mjesecu čime je također uzet faktor sigurnosti, a mjesečna razina je uprosječna za jedan ciklus. Voda od protupranja između dva ciklusa CEB-a je filtrirana voda koja je s membrane skupila zadržane čestice čime smo dobili napojnu vodu tako da praktički može biti ispuštena u recipijent. Zbog toga voda od protupranja nije uzeta u proračun. Potreban volumen spremnika izračunat je prema izrazu (19) odgovara vremenskom periodu od 5 ciklusa isključivo CEB-a odnosno 15 dana uz primijenjenu pretpostavku da se voda od protupranja može direktno ispustiti u recipijent tj okoliš. Odabran je spremnik *BP SCS 5000* volumena 5 m^3 tvrtke *Borplastika BP SCS 13500* [15].

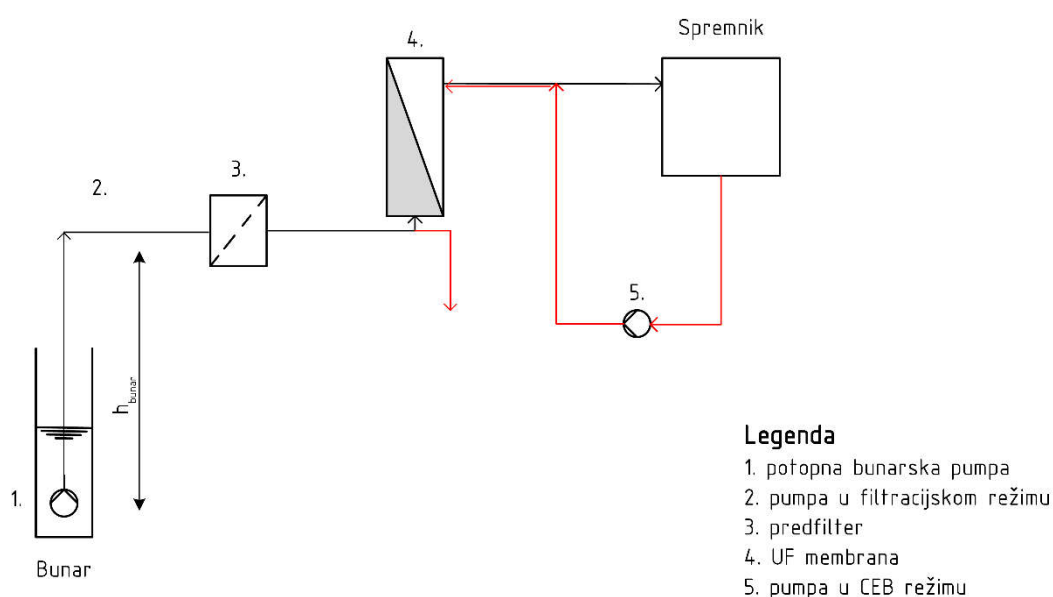
$$V_{\text{spremnik2}} = \frac{N_{dan,mj}}{N_{ciklus,mj}} (2Q_{CEB} \cdot t_{doz} + Q_{isp} \cdot t_{isp})$$

$$= \frac{31}{10} \left(2 \cdot 14 \cdot \frac{90}{3600} + 26 \cdot \frac{60}{3600} \right) = 3,513 \approx 3,5 \text{ m}^3 \quad (19)$$

Spremnici kemikalija za CEB proračunati su prema njihovoj mjesečnoj količini izražene izrazima (14) i (16) za 3 mjeseca, a odabrani proizvodi su tvrtke Prominent veličine 35 L što je i više nego dostatno za predviđene potrebe [16].

4.5. Prikaz utroška energije

Energija u današnjici postaje bitan resurs što zbog svog financijskog efekta što zbog paradigmi u energetske učinkovitosti koje teže što boljem iskorištavanju svih resursa. Energija je i presudan faktor u kvantificiranju procesa, ali i njihovoj međusobnoj usporedbi. Za utrošak energije u konkretnom sustavu za membransku filtraciju korišten je zakon kinetičke energije za jednodimenzijско strujanje poznatiji i kao Bernoulijeva jednadžba. Daljnja modifikacija Bernoulijeve jednadžbe temeljila se na pojednostavljenima koji nisu narušili fizikalnost, a skratili su proračun. Linijski gubici u cijelom cjevovodu sustava su



Slika 15: Principijelna shema značajnih padova tlaka u sustavu zanemareni u odnosu na one lokalnog karaktera.

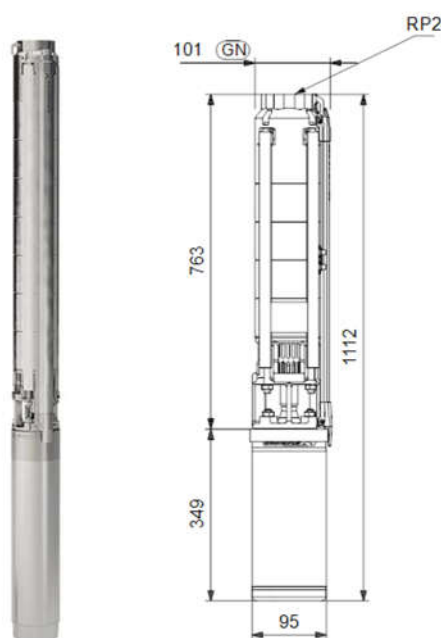
Tablica 6: Padovi tlaka u filtracijskom načinu rada dobiveni pomoću inge® System Designa

veličina	mjerna jedinica	iznos
pad tlaka na prefilteru	mbar	200
prosječni TMP filtracije	mbar	250
pad tlaka u cijevnom razvodu UF jedinice	mbar	50
Σ	mbar	500

Za izračun visine dobave potopne pumpe može se postaviti pojednostavljena modificirana Bernoulijeva jednadžba prema Slici 15 koja je prikazana izrazom (20).

$$h_p = \frac{\Sigma \Delta p}{\rho \cdot g} + h_{bunar} = \frac{500 \cdot 100}{1000 \cdot 9,81} + 25 = 30,0968 \approx 30 \text{ m} \quad (20)$$

Potopna bunarska pumpa egzistencijalan je element dobave bunarske vode. Njezina je zadaća neprekidna dobava vode na razinu tla odnosno postrojenja. Pumpa je odabrana pomoću Grundfosovog mrežnog paketa *Product center* u kojem se upišu željeni projektni podaci, a u konkretnom slučaju to su protok od $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ te visina dobave od 30 metara što je zbrojena pretpostavljena geodetska dubina bunara i visina dobave od padova tlaka u filtracijskom načinu. Odabrani proizvod je potopna crpka *SP 11-7* s odobrenjem za rad s vodom za piće, napravljena je nehrđajućeg čelika pa je visoko otporna na koroziju te je pogodna za dizanje čiste vode kakva otprilike i jest zadana bunarska voda [17]. Na Slici 15 prikazan je njen izgled te tehnički podaci. Za tražene podatke radna točka pada na protok od $11,7 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ te je



Slika 16: Prikaz potpone crpke *SP 11-7* [17]

on skoro za petinu veći od traženog, ali će se to riješiti regulacijom na ventilu koji izlazi iz bunara.

Tablica 7: Kataloški podaci potopne crpke *SP 11-7* [17]

veličina	mjerna jedinica	iznos
protok	$\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$	11,7
dobavna visina	m	30
korisnost crpke	-	68,6 %
korisnost motora	-	74,7 %
ukupna korisnost	-	51,2 %
potrebna električna snaga (P_1)	W	1854

Pumpa za pogon vode u protupranju i CEB-u je najmanje u pogonu, ali je i proračunski najveća zbog visokih padova tlaka u suprotnom smjeru membrane od filtracije. Padovi tlaka u ova dva režima prikazani su u Tablici 8. Praktički, ova pumpa ima dva nazivna protoka, prvi kada radi samo protupranje od $26 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ i drugi za vrijeme CEB-a kada se membrana regenerira $14 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

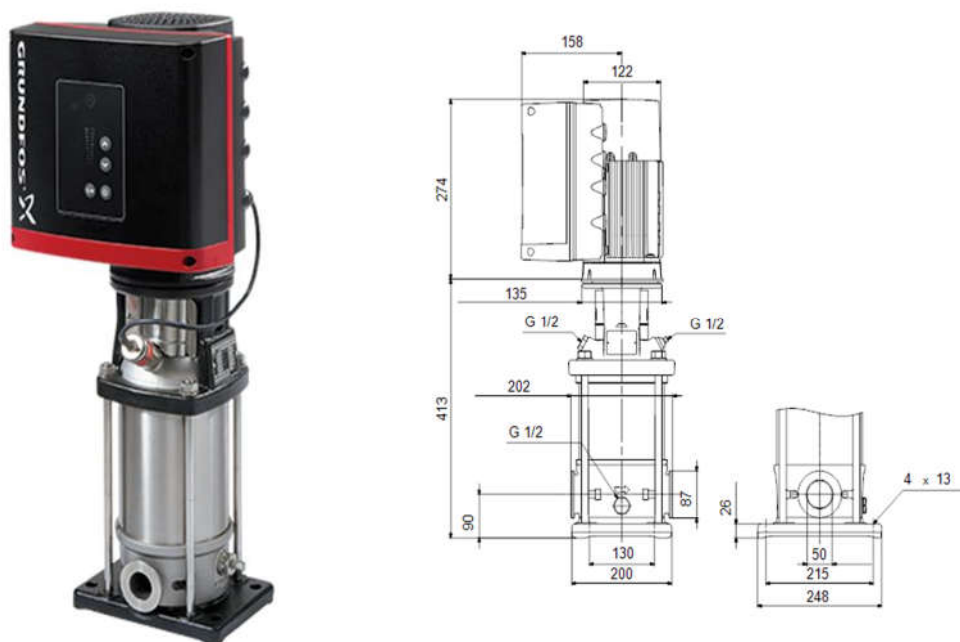
Tablica 8: Padovi tlaka u načinu rada protupranja i CEB-a dobiveni pomoću inge® System Designa

veličina	mjerna jedinica	iznos
prosječni TMP u protupranju	mbar	575
pad tlaka u cijevnom razvodu UF jedinice	mbar	250
ukupni pad tlaka u protupranju	mbar	825
pad tlaka za vrijeme CEB-a	mbar	343

Modificirane Bernoulijeve jednadžbe za izračun visine dobave modelirane su izrazima (21) i (22):

$$(h_p)_{BW} = \frac{\Sigma \Delta p_{BW}}{\rho \cdot g} = \frac{825 \cdot 100}{1000 \cdot 9,81} = 8,4098 \approx 8,5 \text{ m} \quad (21)$$

$$(h_p)_{CEB} = \frac{\Delta p_{CEB}}{\rho \cdot g} = \frac{343 \cdot 100}{1000 \cdot 9,81} = 3,4964 \approx 3,5 \text{ m} \quad (22)$$



Slika 17: Prikaz centrifugalne pumpe CRIE 20-1 A-CA-A-E-HQQE [18]

Odabrani proizvod je centrifugalna pumpa *CRIE 20-1 A-CA-A-E-HQQE* s odobrenjem za rad s vodom za piće te je napravljena nehrđajućeg čelika [18]. Motor pumpe opremljen je frekvencijskim pretvaračem i PI regulatorom koji omogućuju promjenu radnih karakteristika ovisno je li potreba za mehaničkim protupranjem ili ispiranjem nakon CEB-a. Na Slici 17 prikazan su izgled i dimenzije odabrane pumpe, a u Tablici 9 prikazane su karakteristike u odabranim radnim točkama.

Tablica 9: Kataloški podaci centrifugalne pumpe *CRIE 20-1 A-CA-A-E-HQQE* [18]

veličina	mjerna jedinica	iznos	
radna točka		1	2
protok	m ³ h ⁻¹	26	14
dobavna visina	m	8,5	3,5
korisnost crpke	-	53%	59,1%
korisnost motora	-	90,5%	80,8%
ukupna korisnost	-	48%	47,8%
potrebna električna snaga (P ₂)	W	1253	279

Kako su u sustavu najveći potrošači energije upravo pumpe prema njima je i određen ukupan energetska utrošak. Naravno, postoje i drugi potrošači kao što su ventili, regulatori i mjerni uređaji, ali su oni zanemareni u ovom proračunu. Od kataloških podataka najbitnija je potrebna električna snaga za rad pumpe u kojoj su uključeni gubici same pumpe, motora te frekvencijskih pretvarača. Energija potrebna za pogon ovakvog postrojenja dobit će se iz definicijske jednadžbe snage prema modificiranim izrazima za rad pojedine pumpe u ovisnosti o danu rada.

$$\begin{aligned}
 t_1 &= (31 - N_{ciklus,mj})(24 - N_d \cdot (t_{pbw} + t_{bw} + t_{ka})) \\
 &\quad + N_{ciklus,mj}(24 - N_d \cdot (t_{pbw} + t_{bw} + t_{pbw}) - (t_{doz} + t_{nam} + t_{isp})) = \\
 (31 - 10) \left(24 - 23 \cdot \left(\frac{5+35+14}{3600} \right) \right) &+ 10 \left(24 - 23 \cdot \left(\frac{5+35+14}{3600} \right) - \frac{90+15 \cdot 60+60}{3600} \right) = 731,38 \text{ h} \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$W_1 = P_1 \cdot t_1 = 1854 \cdot 731,38 = 1354,14 \text{ kWh} \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
 t_{21} &= (31 - N_{ciklus,mj}) \cdot N_d \cdot (t_{bw} + t_{ka}) + N_{ciklus,mj}(N_d \cdot (t_{bw} + t_{ka}) + t_{isp} + t_{doz}) = \\
 (31 - 10) \cdot 23 \cdot (35 + 14) &+ 10(23 \cdot (35 + 14) + 60 + 90) = 9,75 \text{ h} \quad (26)
 \end{aligned}$$

$$W_{21} = P_{21} \cdot t_{21} = 1,253 \cdot 9,75 = 12,21 \text{ kWh} \quad (27)$$

$$W_{22} = P_{22} \cdot N_{ciklus,mj} \cdot t_{doz} = 0,279 \cdot 10 \cdot \frac{90}{3600} = 0,07 \text{ kWh} \quad (28)$$

Izrazi (24) i (26) predstavljaju vrijeme u radu pumpi. Prvi izraz govori o tome koliko je vremena u mjesecu potopna pumpa u radu, a drugi izraz o tome koliko je centrifugalna pumpa u radu za vrijeme rada mehaničkog protupranja i ispiranja od CEB-a. Izrazi (25), (27) i (28) predstavljaju električnu energiju u radu pojedine faze. Najviše struje troši potopna pumpa što je i bilo za očekivati s obzirom na njeno vrijeme pogona te gubitke koje mora svladati. Ukupni utrošak električne energije dan je izrazom (29).

$$W_{el,uk} = W_1 + W_{21} + W_{22} = 1354,14 + 12,212 + 0,07 = 1366,422 \approx 1366 \text{ kWh} \quad (29)$$

U praksi je puno prikladniji prikaz ovakvih podataka po proizvodnoj jedinici jer se time dobiva šira slika te dodatna mogućnost usporedbe s drugim različitim sustavima pa je za potrebe izračuna specifične električne energije po proizvedenoj jedinici filtrirane vode izračunata ukupna količina filtrirane vode u promatranom periodu prema izrazu (30). Konačno, specifična električna energija izračunata je izrazom (31) dok je u Tablici 10 dan konačan prikaz rezultata proračuna sustava membranske filtracije.

$$V_{filtrat} = Q_u \cdot t_1 = 10 \cdot 731,38 = 7313,8 \approx 7314 \text{ m}^3 \quad (30)$$

$$W_{električna} = \frac{W_{el,uk}}{V_{filtrat}} = \frac{1366}{7314} = 0,1868 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3} \quad (31)$$

Tablica 10: Prikaz utroška kemikalija i energije

naziv	mjerna jedinica	mjesečni iznos
volumni utrošak NaOH (32%)	L	4,75
maseni utrošak NaOH (32%)	kg	6,365
specifični volumni utrošak NaOH (32%)	mL m ⁻³	0,650
volumni utrošak HCl (32%)	L	3
maseni utrošak HCl (32%)	kg	3,48
specifični volumni utrošak HCl (32%)	mL m ⁻³	0,411
utrošak električne energije	kWh	1366,42
specifični utrošak električne energije	kWh m ⁻³	0,187

5. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu ovog rada prikazane su osnove membranskih separacijskih postupaka te je u nastavku predloženo idejno rješenje za membransku ultrafiltraciju bunarske vode kapaciteta $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Za potrebe osnovnog proračuna postrojenja korišten je računalni paket Inge® System Design. Odabrane su ultrafiltracijske jedinice u formi modula sastavljenog od šupljih vlakana za čiji je smještaj predviđen prostor kontejnerske izvedbe. Spremnici za filtrat i prihvati otpadnih voda od pranja zbog svojih dimenzija smješteni su izvan kontejnera. U kontejnerskom prostoru nalazi se i skladište kemikalija koje čini malu prostoriju unutar samog kontejnera. Utrošak kemikalija i energije izražen je na mjesečnoj razini. U prilogu je dana tehnološka shema postrojenja s posudama, armaturom i opremom za automatski rad kao i prikaz smještaja opreme.

LITERATURA

- [1] Picer, M., Tedeschi S.; Voda, Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1963.
- [2] II predavanje kolegija Voda, gorivo i mazivo E, „Kvaliteta prirodnih voda, CO₂, tvrdoće, alkalitet“
- [3] Galović, Antun: Termodinamika I, treće izdanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013.
- [4] Water Structure and Science,
http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_structure_science.html ; pristupljeno 22. prosinca 2018.
- [5] The History Of Clean Drinking Water - https://www.freedrinkingwater.com/resource-history-of-clean-drinking-water.htm?fbclid=IwAR3f07LW4F9xRGjnXCyCrEv27WzHFaCLB1wC9rE-cb2aU0KH_Sgr61ZjCfo ; pristupljeno 23. prosinca 2018.
- [6] Zakon o vodi za ljudsku potrošnju. Narodne novine, 56/2013
- [7] Pravilnik o parametrima sukladnosti, metodama analize, monitoringu i planovima sigurnosti vode za ljudsku potrošnju te načinu vođenja registra pravnih osoba koje obavljaju djelatnost javne vodoopskrbe. Narodne novine, 125/2017
- [8] Hraste M.: Filtracija, Tehnička enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Zagreb, 1963.
- [9] Baker, Richard W.; Membrane Technology and Applications, Membrane Technology and Research, Inc. Newark, California, 2012.
- [10] Crittenden, John C.; Rhodes Trussell R.; Hand, David W.; . Howe, Kerry J.; Tchobanoglous, George: MWH's Water Treatment: Principles and Design, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [11] Skupina autora: Microfiltration and Ultrafiltration Membranes for Drinking Water, Manual Of Water Supply Practices—M53, First Edition, American Water Works Association, 2005.
- [12] http://www.waterline.hr/Prirucnik_za_vodu.pdf , pristupljeno 12. veljače 2019.
- [13] Drljo, E.; Nusprodukti u vodi za piće kao posljedica dezinfekcije hipokloritom, diplomski rad, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb, 2015.

- [14] Technical Specifications dizzer ® XL, dostupno uz računalni paket *inge® System Design*
- [15] <https://www.bor-plastika.hr/spremnici/spremnik-pravokutnog-presjeka/>, pristupljeno 19. veljače 2019.
- [16] <https://www.prominent.com/en/Products/Products/Tanks/p-dosing-tanks.html>, pristupljeno 19. veljače 2019.
- [17] https://product-selection.grundfos.com/product-detail.sizing-result.html?from_suid=155041475817907284821962325247&pumpsystemid=517608916&qcid=517649906 ; pristupljeno 17. veljače 2019.
- [18] https://product-selection.grundfos.com/product-detail.product-detail.html?from_suid=155058777686707157863631384731&pumpsystemid=519189675&qcid=519218707 ; pristupljeno 17. veljače 2019.

PRILOZI

- I. CD-R disk
- II. Tehnička dokumentacija